

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

\_\_\_\_\_  
(повна назва інституту/факультету)

\_\_\_\_\_  
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_  
(підпис)

\_\_\_\_\_  
(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

“ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності \_\_\_\_\_  
(код і назва)

на тему: Сенсор на основі фотодіоду з InSb для середнього ІЧ діапазону

Виконав (-ла): студент (-ка) 6 курсу, групи ДП-92МП  
(шифр групи)

Безручко Марко Валерійович \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник доц., к. т. н. Іващук А.В. \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант з нормоконтролю доц., к.ф.-м.н., с.н.с.  
Георгій СВІСЧНИКОВ \_\_\_\_\_  
(підпис)

Консультант з інформаційних питань доц., к.т.н. Діденко Ю.В. \_\_\_\_\_  
(підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань. Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2020 року

## РЕФЕРАТ

Роботу викладено на 83 сторінках, вона містить 4 розділи, 51 ілюстрацію, 26 таблиць та 24 джерела в переліку посилань.

Об'єктом дослідження став фоточутливий елемент на основі InSb утворений з імплантацією іонів берилію.

Предмет роботи – створення сенсору на основі фоточутливого елементу з InSb, який працює при температурі 77K.

Метою даної роботи є створення сенсору на основі фоточутливого елементу з InSb, який працює при температурі 77K та дослідження його характеристик.

Перший інформаційно-аналітичний розділ роботи містить загальну інформацію про інфрачервоне випромінювання. Також в ньому коротко надана інформація про принципи охолодження фотодіодів та сфери використання.

У другому розділі викладено інформацію про основні процеси технологічного маршруту.

У третьому розділі удосконалюється процес виготовлення фотодіоду

Четвертий розділ включає в себе стартап-проект на основі проведених досліджень. Опис та технологічний аудит ідеї, аналіз ринку, розробка ринкової стратегії та маркетингової програми стартап-проекту.

ФОТОДІОД, INSB, АНТИМОНІД ІНДІЮ, ІОННА ІМПЛАНТАЦІЯ, ФОТОЧУТЛИВИЙ ЕЛЕМЕНТ, АНОДНЕ ОКИСНЕННЯ, ПАСИВАЦІЯ ПОВЕРХНІ

## ABSTRACT

The work is presented on 83 pages, it contains 4 sections, 51 illustrations, 26 tables and 24 sources in the list of references.

The object of the study was a photosensitive element based on InSb formed with the implantation of beryllium ions.

The subject of the work is the creation of a sensor based on a photosensitive element made of InSb, which operates at a temperature of 77K.

The purpose of this work is to create a sensor based on a photosensitive element made of InSb, which operates at a temperature of 77K and study its characteristics.

The first information-analytical section of the work contains general information about infrared radiation. It also briefly provides information on the principles of cooling photodiodes and the scope.

The second section contains information about the main processes of the technological route.

The third section improves the process of manufacturing a photodiode

The fourth section includes a startup project based on research. Description and technological audit of the idea, market analysis, development of market strategy and marketing program of the startup project.

PHOTODIODE, INSB, INDIUM ANTIMONIDE, ION IMPLANTATION, PHOTSENSITIVE ELEMENT, ANODE OXIDATION, SURFACE PASSIVATION

## ЗМІСТ

1. ІНФРАЧЕРВОНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ .....	9
1.1. ЗАСОБИ ПЕРЕДАЧІ ВИПРОМІНЮВАННЯ .....	12
1.2. ВЛАСТИВОСТІ ДЕТЕКТОРІВ.....	14
1.3. ТИПИ ІНФРАЧЕРВОНИХ ДЕТЕКТОРІВ.....	19
1.4. ОХОЛОДЖЕННЯ ДЕТЕКТОРІВ .....	22
1.4.1. КРЮГЕННЕ ОХОЛОДЖЕННЯ .....	22
1.4.2. ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ОХОЛОДЖУВАЧ.....	24
1.4.3. ОХОЛОДЖЕННЯ ДЖОУЛЯ-ТОМПСОНА .....	25
1.4.4. ОХОЛОДЖЕННЯ ЦИРКУЛЯЦІЄЮ ГАЗУ .....	26
1.5. ЗАСТОСУВАННЯ ДЕТЕКТОРІВ ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ .....	27
1.5.1. ОПТИЧНІ ЛІЧИЛЬНИКИ ПОТУЖНОСТІ .....	27
1.5.2. ЛАЗЕРНІ ТЕЛЕВІЗОРИ .....	27
1.5.3. ТЕРМОМЕТРИ ВИПРОМІНЮВАННЯ .....	28
1.5.4. ВИЯВЛЕННЯ ПОЛУМ'Я.....	28
1.5.5. АНАЛІЗАТОРИ ВОЛОГИ.....	29
1.5.6. ГАЗОАНАЛІЗАТОРИ.....	29
1.5.7. ІНФРАЧЕРВОНІ ПРИСТРОЇ ФОРМУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ .....	30
1.5.8. ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ.....	31
1.5.9. СОРТУВАЛЬНІ ПРИСТРОЇ.....	32
1.5.10. ВИЯВЛЕННЯ ПРИСУТНОСТІ ЛЮДИНИ.....	32
1.5.11. СПЕКТРОФОТОМЕТРИ.....	34
2. ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ФОТОДІОДІВ .....	36
2.1. ПРОГНОЗУВАННЯ ДІАПАЗОНУ ЗУПИНКИ ІОНІВ ПРИ ІМПЛАНТАЦІЇ В INSB .....	37
2.2. ВИМІРЮВАННЯ ПРОФІЛЮ РОЗПОДІЛУ ВЕ, ІМПЛАНТОВАНОГО INSB. МАСС-СПЕКТРОМЕТРІЯ ВТОРИННИХ ІОНІВ (SIMS) .....	39
3. РОЗРОБКА ФОТОДІОДУ .....	42
3.1 КОНСТРУКЦІЯ, ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАННЯ ВАХ ФЧЕ, ОТРИМАНИХ НА І ЕТАПІ. ....	42

3.2 ДООПРАЦЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ФЧЕ, ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОДІОДІВ. АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ. ....	46
3.3. КОРИГУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ, ПАРАМЕТРІВ СТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ФЧЕ.....	48
3.4. АНОДНЕ ОКИСЛЕННЯ АНТИМОНІДУ ІНДІО ФУНКЦІОНАЛЬНЕ ПРИЗНАЧЕННЯ ПАСИВАЦІЙНОГО ШАРУ .....	56
3.4.1. МЕТОДИ ПАСИВАЦІЇ АНТИМОНІДУ ІНДІО .....	58
3.4.2. ПАСИВАЦІЯ АНТИМОНІДУ ІНДІА МЕТОДОМ АНОДНОГО ОКИСЛЕННЯ.....	60
3.5 ВИБІР ТРАВНИКА INSB ДЛЯ ФОРМУВАННЯ МЕЗАСТУКТУРИ ФОТОЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТУ. ....	64
4. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ .....	71
4.1. ОПИС ІДЕЇ ПРОЕКТУ .....	71
4.2. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АУДИТ ІДЕЇ ПРОЕКТУ .....	72
4.3. АНАЛІЗ РИНКОВИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ЗАПУСКУ СТАРТАП-ПРОЕКТУ .....	73
4.4. РОЗРОБЛЕННЯ РИНКОВОЇ СТРАТЕГІЇ ПРОЕКТУ .....	78
4.5. РОЗРОБЛЕННЯ МАРКЕТИНГОВОЇ ПРОГРАМИ СТАРТАП-ПРОЕКТУ .	79
ВИСНОВКИ.....	81
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	82

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- КРТ – Кадмій-Ртуть-Теллур
- ПЗЗ – Пристрій із зарядовим зв'язком
- ПЗІ – Пристрій із зарядовою інжекцією електронів
- МФП – Матриця фокальної площини
- SIRTF – Космічний інфрачервоний телескоп (Space Infrared Telescope Facility)
- ВАХ – Вольт-амперна характеристика
- ОПЗ – Об'ємний просторовий заряд
- SRIM - The Stopping Range of Ions in Matter
- SIMS – Мас-спектрометрія у вторинних іонах (Secondary-ion mass spectrometry)
- ЕРС – Електрорушійна сила
- PECVD - Хімічне осадження з газової фази з плазмової активацією процесу (Plasma-enhanced chemical vapor deposition)
- ВЧ – Високочастотний
- НДР – Науково-дослідницька робота
- ФЧЕ – Фоточутливий елемент
- ПНХТ – Прилад для спостереження характеристик транзисторів (прибор для наблюдения характеристик транзисторов)
- ALD - Атомно шарове напорошення за умов надвисокого вакууму (Atomic layer deposition)
- RTA - Швидкий термічний відпал (Rapid thermal annealing)
- КФЛ - Контактна фотолітографія
- КП - Контактна площадка
- ТКР – Температурний коефіцієнт розширення
- ICP – Індуктивно-пов'язана плазма
- TOF - Time-of-Flight

НВО – Науково-виробниче об'єднання

## ВСТУП

В середині і наприкінці 1950-х років було виявлено, що InSb має найменшу ширину забороненої зони серед відомих в той час напівпровідників і перспективність його застосування в якості детектора для середньохвильової області ІЧ-діапазону довжин хвиль стала очевидною. Величина забороненої зони InSb не є повністю узгодженою із спектральним діапазоном 3-5 мкм при високих робочих температурах, тому кращі характеристики можуть бути отримані при використанні матеріалу  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ . InAs подібний InSb, але має велику ширину забороненої зони. тому на основі цього матеріалу були виготовлені фотовольтаїчні і фотопровідні детектори з граничною довжиною хвилі 3-4 мкм. Детектори на основі антимоніду індію широко використовувалися в високоякісних системах детектування протягом п'яти десятиліть. Фотодіоди на основі InSb більше 50 років застосовувалися в оборонній промисловості. Можливо, найвідомішою (і найбільш успішною) з цих систем була система наведення на повітряні цілі Sidewinder для ракет повітря-повітря. Технології виробництва InSb добре вивчені, а винахід ПЗЗ і ПЗІ приладів збільшив інтерес до цих напівпровідників.



## 1. ІНФРАЧЕРВОНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ

Інфрачервоне випромінювання (ІЧ) – електромагнітне випромінювання, що охоплює довжину хвиль від 700 нанометрів (нм) до 1 міліметра (мм). Інфрачервоні хвилі довші, ніж хвилі видимого світла, але коротші, ніж радіохвилі. Відповідно, частоти ІЧ випромінювання вищі, ніж у мікрохвиль, але нижчі, ніж у видимого світла, і становлять приблизно від 300 ГГц (що відповідає довжині хвилі 1мм) до 400 ТГц (700нм).

Інфрачервоне випромінювання має такі характеристики:

- Невидиме для людського ока. Це корисно для програм безпеки, але іноді ускладнює вимірювання та структуру оптичної системи.
- Мала енергія. Енергія інфрачервоного випромінювання дорівнює енергії коливання або обертання молекул. Це явище дає можливість ідентифікувати молекули.
- Більша довжина хвилі у порівнянні з видимим спектром. Це означає, що інфрачервоне випромінювання менше розсіюється і забезпечує кращу передачу через різні середовища.
- Всі предмети в тій чи іншій мірі випускають інфрачервоне випромінювання, чим сильніше нагрітий предмет, тим сильніше він випромінює в інфрачервоному діапазоні.

Як було сказано вище, усі об'єкти з абсолютною температурою понад 0К випромінюють інфрачервоні хвилі. Інфрачервона променева енергія визначається температурою та станом поверхні об'єкта. Припустимо, існує об'єкт, який поглинає всю випромінену енергію і здається абсолютно чорним на довжинах хвиль. Цей об'єкт називається "чорним тілом". Нижче представлені формули опису «чорного тіла»:

- Формула Планка

$$R(\lambda, T) = 2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2 \cdot \lambda^{-5} [\exp (h \cdot c / \lambda \cdot k \cdot T) - 1]^{-1}, \text{ де}$$

$R(\lambda, T)$  – потужність випромінювання на одиницю площі випромінюючої поверхні в одиничному інтервалі довжин хвиль;

$$\pi \approx 3,142;$$

$T$  – температура випромінюючого тіла;

$$h \approx 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \text{ – стала Планка};$$

$$c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \text{ – швидкість світла};$$

$\lambda$  – довжина хвилі;

$$k \approx 1,38 \cdot 10^{23} \text{ Дж/К} \text{ – стала Больцмана.}$$

- Закон Стефана-Больцмана

$$R = \sigma \cdot T^4, \text{ де}$$

$R$  – потужність випромінювання на одиницю площі поверхні;

$$\sigma \approx 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4) \text{ – стала Стефана-Больцмана.}$$

- Закон зміщення Віна

$$\lambda = b/T, \text{ де}$$

$$b = 0,02898 \text{ м} \cdot \text{К} \text{ – постійна Віна.}$$

Стосовно об'єктів, відмінних від чорних тіл, можна встановити наступне співвідношення:

$$R' = \varepsilon \cdot R, \text{ де}$$

$\varepsilon$  – коефіцієнт випромінювальної здатності об'єкта.

Коефіцієнт випромінювання  $\varepsilon$  змінюється в залежності від стану поверхні об'єкта, довжини хвилі та температури об'єкта. Оскільки випромінювальна здатність еквівалентна поглинанню, випромінювальна здатність об'єкта з великим відбиттям або пропусканням стає малою.

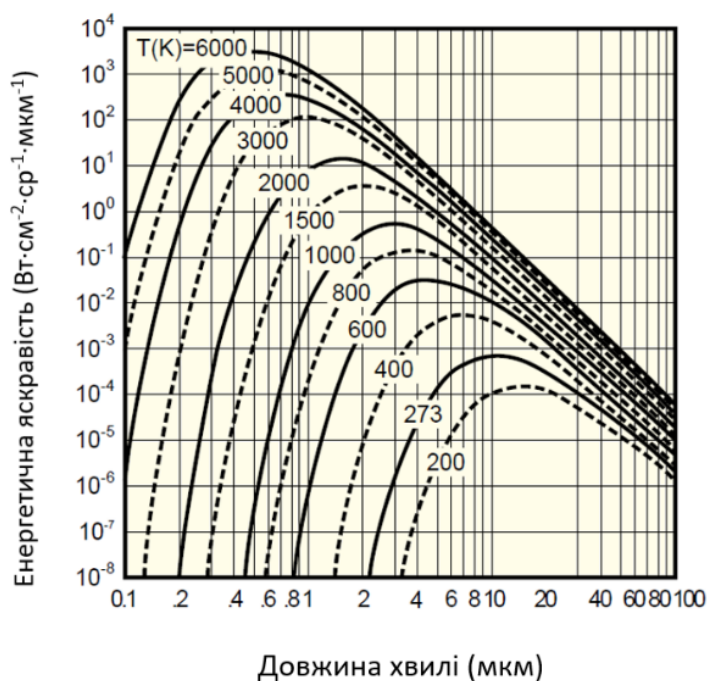


Рисунок 1.1 – Спектральна характеристика випромінювання чорного тіла.  
Інфрачервоні джерела

Як було зазначено вище, усі об'єкти з абсолютною температурою понад 0 K випромінюють інфрачервону енергію. Наприклад, людське тіло при температурі 310 K (37 ° C) випромінює інфрачервону енергію з піковою довжиною хвилі близько 10 мкм. Інфрачервоні джерела включають випромінювачі на основі чорного тіла, вольфрамові лампи, карбід кремнію та інші речовини (табл. 1.1). Окрім цих джерел випромінювання використовуються також інфрачервоні лазери, які випромінюють інфрачервону енергію певної довжини хвилі.

За винятком інфрачервоного джерела, яке потрібно виміряти, існує фонове випромінювання від землі при температурі 300 K. Якщо система вимірювань потрібна для області довжини хвилі понад 3 мкм, шум коливання фонового випромінювання не буде ігноруватися. Щоб зменшити цей тип шуму, в більшості випадків застосовуються холодні екрани та холодні фільтри.

Таблиця 1.1 – Інфрачервоні джерела

Тип	Метод	Матеріал	Приклад джерела випромінювання	Довжина хвилі (мкм)	Особливості
Теплове випромінювання	Нагрівання резистора потоком струму	Вольфрам	Інфрачервона лампа	1 – 2.5	Довжина довжини хвилі зменшується зовнішньою колбою (склом). Вторинне випромінювання випромінюється через трубку.
		Ніхром	Електричний обігрівач	2 – 5	
		Карбід кремнію	Глобар	1 – 50	Стала напруга, високий струм
		Кераміка	Лампа Нернста	1 – 50	Необхідний попередній нагрів
	Вторинний нагрів за допомогою іншого джерела живлення	Метал (нержавіюча сталь, тощо)	Нагрівач оболонки	4 – 10	
		Кераміка	Лампа типу IRS	4 – 25	
			Променевий нагрівач	1 – 20	Нагрів відбувається при спаленні газу
	Нагрівання розрядом	Вуглець	Вугільна дугова лампа	2 – 25	Викликає деякі екологічні забруднення, такі як сажа.
Холодне випромінювання	Газовий розряд	Ртуть Цезій Ксенон	Ртутна лампа Ксенонова лампа	0.5 – 2.5	Довжина довжини хвилі зменшується зовнішньою колбою (склом). Вторинне випромінювання випромінюється через трубку.
Стимульоване випромінювання	Лазерна реакція	Вуглекислий газ Сполуки GaAs Сполуки Pb	CO <sub>2</sub> -лазер Лазер InGaAsP Лазер PbSnTe	9 – 11 1.1 – 1.5 6 – 7	

### 1.1. ЗАСОБИ ПЕРЕДАЧІ ВИПРОМІНЮВАННЯ

Типові приклади інфрачервоних передавальних середовищ включають вакуум, атмосферу та оптичні волокна. В атмосфері (рис. 1.3) поглинання H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> та іншими елементами відбувається на певних довжинах хвиль. Смути частот від 3 мкм до 5 мкм та від 8 мкм до 12 мкм, де інтенсивність поглинання нижча, іноді називають "атмосферними вікнами" і часто використовуються для дистанційного зондування. Розроблено оптичні волокна з кварцу з коефіцієнтом

ослаблення, який майже досягає теоретичного значення, але інші інфрачервоні волокна все ще вдосконалюються

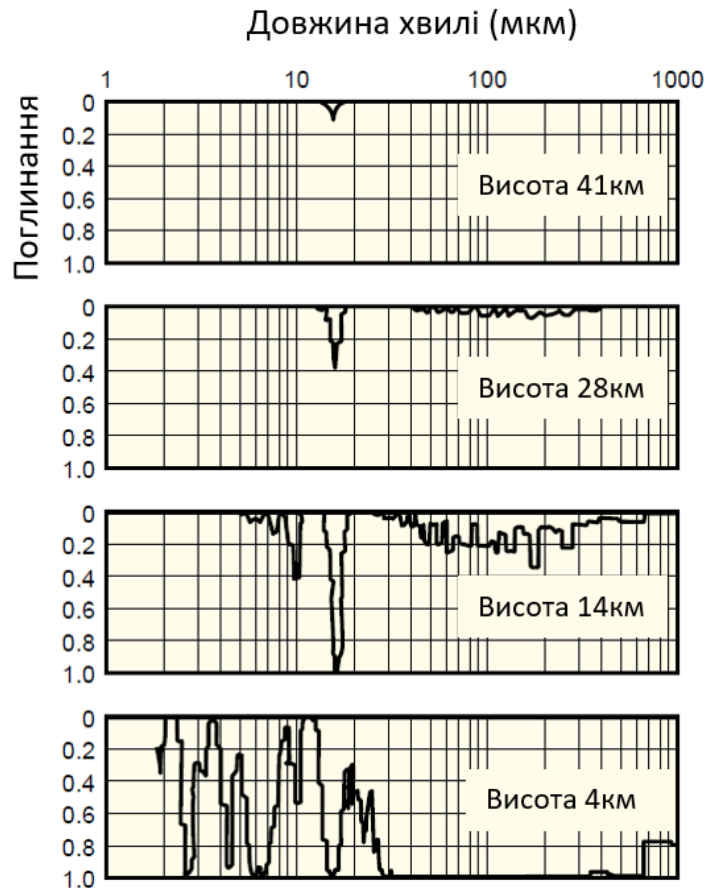


Рисунок 1.2 – Поглинання атмосферою на різних висотах



Рисунок 1.3 – Поглинання атмосферою на рівні моря

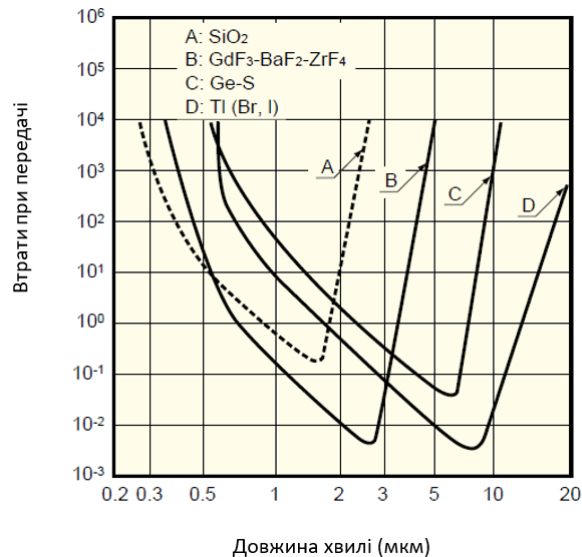


Рисунок 1.4 – Теоретично розраховані втрати при передачі в оптичних волокнах

## 1.2. ВЛАСТИВОСТІ ДЕТЕКТОРІВ

Існує два основних типи: тепловий тип, який не має залежності від довжини хвилі, і квантовий тип, який залежить від довжини хвилі. Енергія інфрачервоного випромінювання виражається наступним рівнянням:

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.24}{\lambda} \text{ [eV]}, \text{ де}$$

$h \approx 4,14 \cdot 10^{-15}$  Дж · с – стала Планка;

$c \approx 3 \cdot 10^{10}$  см/с – швидкість світла;

$\lambda$  – довжина хвилі у мкм.

У порівнянні з видимими та ультрафіолетовими променями, інфрачервоне випромінювання має невелику енергію, а саме 1,24 еВ при 1 мкм та 0,12 еВ при 10 мкм. Для підвищення ефективності інфрачервоного виявлення детектор слід

охолоджувати. Основними характеристиками, що вказують на ефективність роботи інфрачервоного детектора, є чутливість до світла, еквівалентна потужність шуму (ЕПШ) та  $D^*$ .

- Фоточутливість

Фоточутливість - це відношення вихідної напруги (або вихідного струму) до кількості ват падаючої енергії, коли шумом можна знехтувати.

$$R = \frac{S}{PA} \left[ \frac{B}{B_T} \right], \text{ де}$$

$S$  – значення сигналу на виході [В];

$P$  – кількість падаючої енергії  $\left[ \frac{B_T}{\text{см}^2} \right]$ ;

$A$  – активна площа поверхні детектора  $[\text{см}^2]$ .

Вихідні сигнали з фотоелектричних детекторів зазвичай реєструються як фотострум, тому фоточутливість виражається в  $\left[ \frac{A}{B_T} \right]$ . Коли світло на даній довжині хвилі потрапляє у фотоелектричний детектор, фотострум ( $I_{sc}$ ) виражається наступним рівнянням:

$$I_{sc} = \eta \cdot q \frac{P \cdot A}{h \cdot \frac{c}{\lambda}} = \frac{\eta \cdot q \cdot P \cdot A \cdot \lambda}{h \cdot c}, \text{ де}$$

$q$  – заряд електрону;

$\eta$  – квантова ефективність.

Таким чином, рівняння для фоточутливості  $R_\lambda$  має такий вигляд:

$$R_\lambda = \frac{I_{sc}}{PA} = \frac{\eta \cdot q \cdot \lambda}{h \cdot c} = \frac{\eta \cdot \lambda}{1,24},$$

а співвідношення для квантової ефективності  $\eta$ :

$$\eta = 1,24 \frac{R_\lambda}{\lambda}.$$

У випадку, коли реєстрація вихідних сигналів відбувається у вигляді напруги, застосовується схема, яка зображена на рис. 1.5. У такому випадку фоточутливість виражається в  $\left[\frac{B}{B_T}\right]$ .

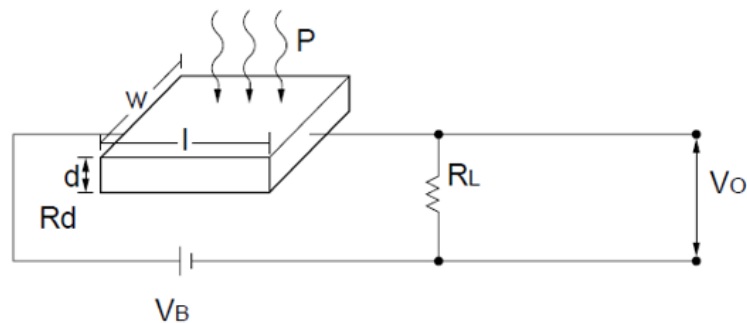


Рисунок 1.5 – Приклад схеми вимірювання вихідного сигналу для фотопровідного детектора.  $R_d$  – темновий опір фотодетектора,  $R_L$  - навантажувальний опір,  $V_O$  – вихідна напруга,  $V_B$  – джерело живлення

Вихідну напругу  $V_O$  можна визначити за формулою:

$$V_O = \frac{R_L}{R_d + R_L} \cdot V_B$$

Зміну  $V_O$  внаслідок зміни  $R_d$  під впливом світла можна визначити за формулою:

$$\Delta V_O = -\frac{R_L \cdot V_B}{(R_d + R_L)^2} \cdot \Delta R_d.$$



$\Delta R_d$  можна визначити за формулою:

$$\Delta R_d = -R_d \frac{q(\mu_n + \mu_p)}{\sigma} \cdot \frac{\eta \cdot \tau \cdot \lambda \cdot P \cdot A}{V_d \cdot h \cdot c}, \text{ де}$$

$\tau$  – час життя носіїв заряду;

$\mu_n$  – рухливість електронів;

$\mu_p$  – рухливість дірок;

$\sigma$  – електрична провідність;

$V_d$  – об'єм фоточутливого елементу.

Враховуючи це, вираз для фотопровідності можна записати у вигляді:

$$R_\lambda = \frac{\Delta V_O}{P A} = \frac{q \cdot \eta \cdot \tau \cdot \lambda (\mu_n + \mu_p)}{\sigma \cdot V_d \cdot h \cdot c} \cdot \frac{R_d \cdot R_L \cdot V_B}{(R_d + R_L)^2}$$

Однак дуже мало випадків, коли квантова ефективність визначається за наведеними формулами, оскільки  $R_d$ ,  $\mu_n$ ,  $\mu_p$ ,  $\tau$  і  $\sigma$  - величини, які пов'язані між собою.

- Еквівалентна потужність шуму (NEP)

Це кількість падаючого світла, що дорівнює рівню власного шуму детектора. Іншими словами, це кількість падаючого світла, коли відношення сигнал/шум (S/N) дорівнює 1.

$$NEP = \frac{P \cdot A}{S/N \cdot \sqrt{\Delta f}} \left[ \frac{Вт}{Гц^{1/2}} \right], \text{ де}$$

$N$  – вихідний шум [В];

$\Delta f$  – ширина смуги шуму [Гц].

- Порогова чутливість:  $D^*$

$D^*$  - це фоточутливість на одиницю активної площі детектора, що полегшує порівняння характеристик різних детекторів. У багатьох детекторах NEP пропорційний квадратному кореню активної площі детектора, тому  $D^*$  визначається наступним рівнянням:

$$D^* = \frac{S/N \cdot \sqrt{\Delta f}}{P \cdot \sqrt{A}} = \frac{\sqrt{A}}{NEP} \left[ \frac{\text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}}{\text{Вт}} \right]$$

Як правило, умови вимірювання  $D^*$  виражаються у форматі  $D^*(A, B, C)$ , де  $A$  - температура [К] або довжина хвилі [мкм] джерела випромінювання,  $B$  - частота зрізу, і  $C$  - пропускна здатність. Можна сказати, що більше значення  $D^*$  вказує на кращий детекторний елемент.

Вибираючи інфрачервоні детектори для своїх застосувань, необхідно враховувати довжину хвилі, час відгуку, спосіб охолодження, активну площу та форму, кількість елементів (один елемент, одновимірний масив, двовимірний масив тощо) додатково до вищевказаних характеристик.

При вимірюванні характеристик інфрачервоного детектора як джерело випромінювання часто використовується чорне тіло температурою 500 К. Між  $D^*(500, f, 1)$  цього чорного тіла, що використовується як джерело випромінювання, та  $D^*(\lambda_p, f, 1)$  на піковій довжині хвилі чутливості детектора, можна приблизно встановити залежність (рис 1.6).

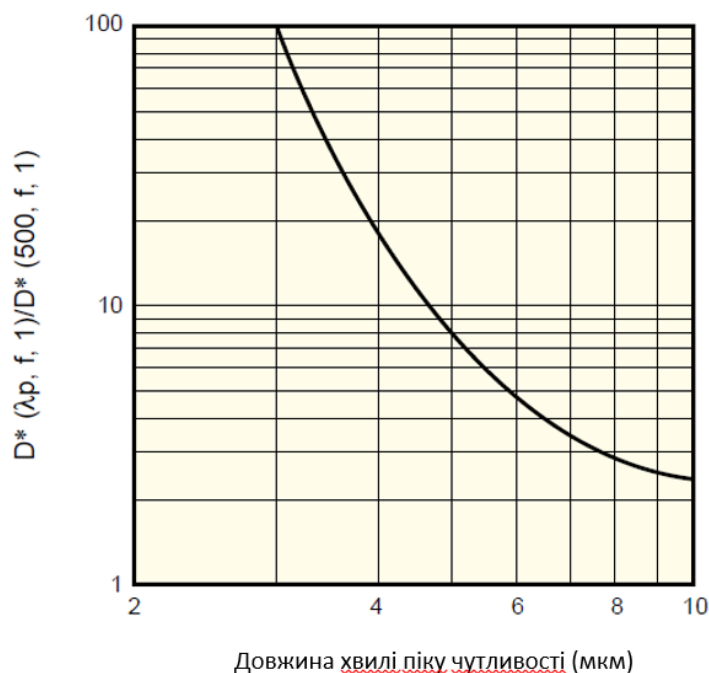


Рисунок 1.6 – Відношення порогової чутливості до пікової довжини хвилі чутливості фотодетектора

### 1.3. ТИПИ ІНФРАЧЕРВОНИХ ДЕТЕКТОРІВ

Інфрачервоні детектори класифікуються на теплові типи та квантові типи. Теплові детектори використовують інфрачервону енергію як тепло, і їх фоточутливість не залежить від довжини хвилі. Теплові детектори не потребують охолодження, але мають недоліки, оскільки час відгуку є повільним, а здатність виявлення низькою.

На відміну від них, квантові детектори пропонують вищу ефективність виявлення та вищу швидкість відгуку, хоча їх фоточутливість залежить від довжини хвилі. Як правило, квантові детектори повинні бути охолоджені для точного вимірювання, за винятком детекторів, що використовуються в ближній ІЧ-області. Типи інфрачервоних детекторів наведені в таблиці 2 1, а їх типові спектральні характеристики - на малюнку 2-1.

Таблиця 1.2 – Типи інфрачервоних детекторів

Тип			Детектор	Спектр. відгук (мкм)	Робоча температура (K)	$D^* \left[ \frac{\text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}}{\text{Вт}} \right]$
Тепловий	Термопара			Залежить від матеріалу	300	$D^*(\lambda, 10, 1) = 6 \cdot 10^8$
	Болометр				300	$D^*(\lambda, 10, 1) = 1 \cdot 10^8$
	Пневматичний елемент		Датчик Голея		300	$D^*(\lambda, 10, 1) = 1 \cdot 10^9$
	Піроелектричний детектор		PZT, TGS		300	$D^*(\lambda, 10, 1) = 2 \cdot 10^8$
Квантовий	Власний тип	Фотопровідний тип	PbS	1 – 3.6	300	$D^*(500, 600, 1) = 1 \cdot 10^9$
			PbSe	1.5 – 3.8	300	$D^*(500, 600, 1) = 1 \cdot 10^8$
			InSb	2 – 6	213	$D^*(500, 1200, 1) = 2 \cdot 10^9$
			HgCdTe	2 – 16	77	$D^*(500, 1000, 1) = 2 \cdot 10^{10}$
		Фотоелектричний тип	Ge	0.8 – 1.8	300	$D^*(\lambda_p) = 1 \cdot 10^{11}$
			InGaAs	0.7 – 1.7	300	$D^*(\lambda_p) = 2 \cdot 10^{12}$
			InAs	1.2 – 2.55	77	$D^*(500, 1200, 1) = 1 \cdot 10^{10}$
			InSb	1 – 5.5	77	$D^*(500, 1200, 1) = 2 \cdot 10^{10}$
			HgCdTe	2 – 16	77	$D^*(500, 1000, 1) = 2 \cdot 10^9$
		Невласний тип	Ge : Au	1 – 10	77	$D^*(500, 900, 1) = 1 \cdot 10^{11}$
			Ge : Hg	2 – 14	4.2	$D^*(500, 900, 1) = 8 \cdot 10^9$
			Ge : Cu	2 – 30	4.2	$D^*(500, 900, 1) = 5 \cdot 10^9$
			Ge : Zn	2 – 40	4.2	$D^*(500, 900, 1) = 5 \cdot 10^9$
			Si : Ga	1 – 17	4.2	$D^*(500, 900, 1) = 5 \cdot 10^9$

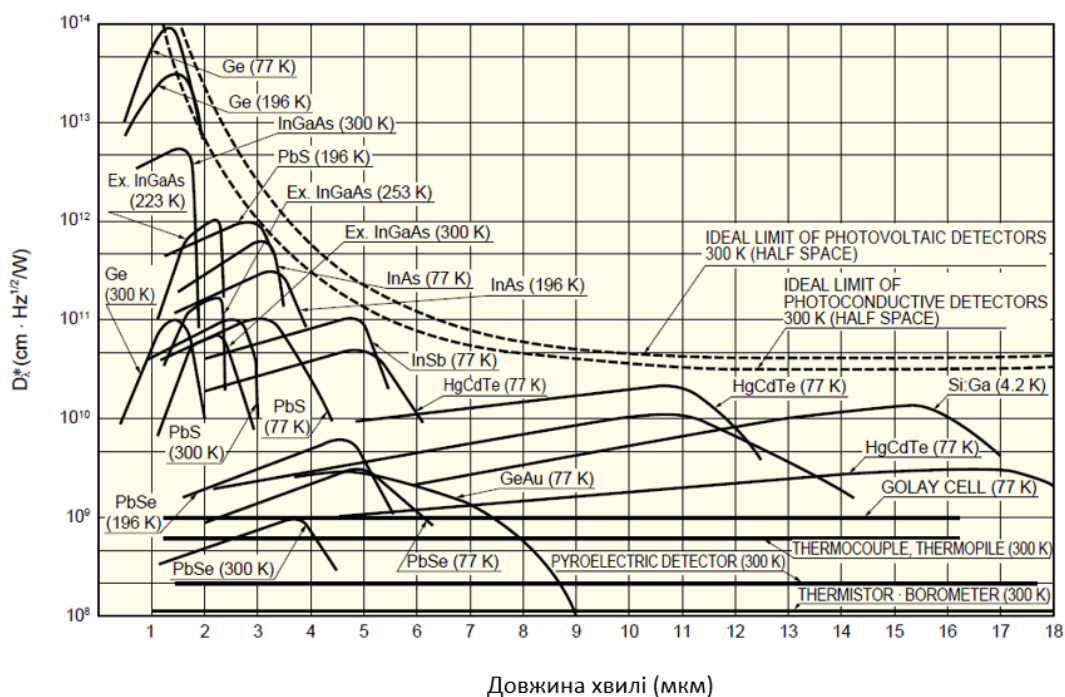


Рисунок 1.7 – Спектральна залежність виявляючої здатності фотоприймачів на основі різних напівпровідникових матеріалів

Деякі шуми виникають при виявленні інфрачервоного випромінювання. Цей шум може надходити від самого інфрачервоного детектора, від його робочих ланцюгів або від фонових коливань. Припустимо, що шум від інфрачервоного детектора та його ланцюгів можна ігнорувати порівняно з шумом, спричиненим коливанням фону. Межа виявлення визначається лише шумом від фонових коливань. Це називається "Background Limited Infrared Photodetection (BLIP)". BLIP фотоелектричних детекторів та фотопровідних детекторів визначаються наступним чином:

$$D_{\lambda}^* = \frac{\lambda \sqrt{\eta}}{h \cdot c \sqrt{2 \cdot Q}} \left[ \frac{\text{см} \cdot \Gamma_{\text{ц}}^{1/2}}{\text{Вт}} \right] \text{ для фотоелектричних детекторів,}$$

$$D_{\lambda}^* = \frac{\lambda \sqrt{\eta}}{2 \cdot h \cdot c \sqrt{Q}} \left[ \frac{\text{см} \cdot \Gamma_{\text{ц}}^{1/2}}{\text{Вт}} \right] \text{ для фотопровідних детекторів, де}$$

$\lambda$  – довжина хвилі;  
 $\eta$  – квантова ефективність;  
 $h$  – стала планка;  
 $c$  – швидкість світла;  
 $Q$  – потік фонового випромінювання.

## **1.4. ОХОЛОДЖЕННЯ ДЕТЕКТОРІВ**

Інфрачервоні детектори охолоджуються, щоб поліпшити відношення параметру  $S/N$  або підтримувати елемент детектора за сталої температури. В даний час доступні різні техніки охолодження, такі як кріогенне охолодження за допомогою посудини Дьюара з використанням рідкого азоту ( $-196^{\circ}\text{C}$ ) або сухого льоду ( $-77^{\circ}\text{C}$ ), термоелектричне охолодження, охолодження Джоуля-Томсона та охолодження циркуляцією газу.

### **1.4.1. КРІОГЕННЕ ОХОЛОДЖЕННЯ**

Для цього охолодження зазвичай використовується посудина дьюара для інфрачервоних детекторів, в якому детекторний елемент закріплений у скляному або металевому вакуумному контейнері. Як кріоген часто використовують рідкий азот 77K ( $-196^{\circ}\text{C}$ ) або сухий лід 196K ( $-77^{\circ}\text{C}$ ). Як правило, детектор може експлуатуватися протягом приблизно 8 годин при заповненні кріогену. Температура елемента детектора може бути додатково знижена шляхом декомпресії кріогену всередині посудини.

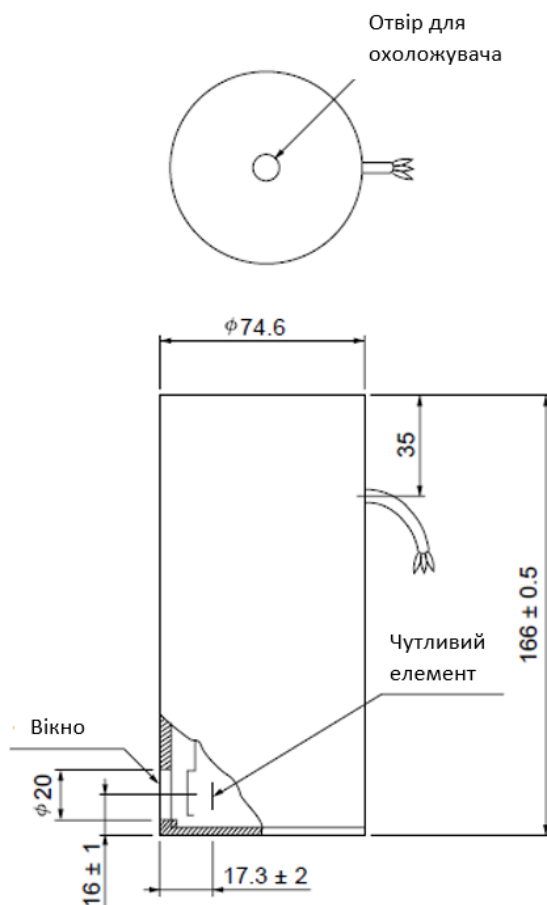


Рисунок 1.8 – Конструкція скляної посудини Дьюара для охолодження чутливого елементу

Обмеження технології:

- Скляна посудина Дьюара дуже крихка, тому використання надмірної сили під час фіксації може її пошкодити.
- Будь яка волога, або краплі води у контейнері охолоджувача під час додавання рідкого азоту можуть розірвати посудину.
- Рідкий азот необхідно вливати поступово. Якщо залити занадто багато у короткий проміжок часу – це може призвести до вибуху.
- Контейнер необхідно зберігати за низьких температур. При підвищенні температури з внутрішньої стінки посудини може виділятися газ. Це призведе до зменшення ступеню вакууму, завдяки чому час утримання криогену скорочується. Термін зберігання вакууму для скляних контейнерів становить від 3 до 5 років. Для металевих – від 1 до 2 років.

### 1.4.2. ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ОХОЛОДЖУВАЧ

Коли електричний струм надходить до певного типу напівпровідника, один кінець напівпровідника охолоджується, а інший кінець нагрівається. Це явище називається «Ефект Пельтьє» (рис. 1.9). Цей ефект Пельтьє можна використовувати для охолодження елементів детектора.

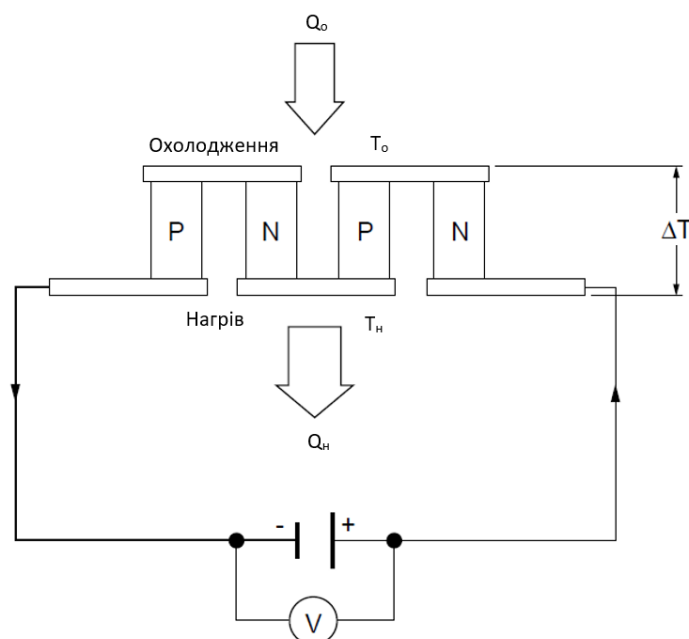


Рисунок 1.9 – Ефект Пельтьє

У детекторах з термометричним охолодженням використовується одноступеневий, двоступеневий або триступеневий термоелектричний охолоджувач. Їх відповідні температурні перепади  $\Delta T_p$  між охолоджуючим елементом та основою корпусу становлять  $50^{\circ}\text{C}$ ,  $70^{\circ}\text{C}$  та  $100^{\circ}\text{C}$ . При використанні повітряного охолодження, навіть незважаючи на те, що проводиться достатньо теплового випромінювання, температура корпусу стає приблизно на  $15^{\circ}\text{C}$  вище температури приміщення через тепловий опір між основою та радіатором. Тому найнижча температура елемента, яку можна отримати при кімнатній температурі  $25^{\circ}\text{C}$ , становить  $-10^{\circ}\text{C}$  для одноетапного термоелектричного охолодження,  $-30^{\circ}\text{C}$  для двоступеневого охолодження та  $-60^{\circ}\text{C}$  для триступеневого охолодження. Тобто їх відповідні суттєві різниці температур  $\Delta T$  щодо температури навколишнього середовища становлять приблизно  $35^{\circ}\text{C}$  для одноетапного



термоелектричного охолодження, 55°C для двоступеневого охолодження та 85°C для тріступеневого охолодження.

Обмеження технології:

- Необхідно використовувати блок живлення з низьким рівнем пульсацій.
- Необхідно дотримувати полярність при підключенні блоку живлення. При зміні полярності та при раптовому підвищенні температури інфрачервоний детектор може бути пошкоджений.
- Якщо струм перевищує вказане значення (1,5 А для одноступеневих термоелектричних охолоджувачів, 1,0 А для двоступеневих і тріступеневих термоелектричних охолоджувачів), інфрачервоний детектор нагрівається. Щоб тривалий час використовувати детектор у стабільному стані, необхідно використовувати охолоджувач при 70% від зазначеного значення.
- Необхідно використовувати терморезистор для вимірювання температури в межах його номінального значення.
- При використанні регулятора температури необхідно враховувати можливості охолодження охолоджуючого елемента та встановлювати температуру управління, яка відповідає умовам температури навколишнього середовища. Встановлення температури вище, ніж охолоджуюча здатність  $\Delta T$ , перешкоджатиме стабільному контролю температури.

#### **1.4.3. ОХОЛОДЖЕННЯ ДЖОУЛЯ-ТОМПСОНА**

Зниження температури відбувається, якщо газ (наприклад, аргон або азот) високого тиску (150 кг/см<sup>2</sup>) раптово розширюється, що називається "ефектом Джоуля-Томсона". Цей ефект може бути використаний для охолодження елементів детектора до такої низької температури, як і температура кріогену.



Рисунок 1.10 – Конструкція охолоджувача Джоуля-Томпсона

#### 1.4.4. ОХОЛОДЖЕННЯ ЦИРКУЛЯЦІЄЮ ГАЗУ

Оскільки охолодження Джоуля-Томпсона розряджає охолоджений газ, воно не придатне для використання протягом тривалого періоду часу. З іншого боку, циркуляційне охолодження газу зберігає охолоджений газ і стискає його для повторного використання. Циркуляційна система охолодження газу складається з 3 блоків (розширювач, компресор та теплообмінник). Розширювач і компресор поділяються на поворотний тип, який працює за допомогою турбіни та поршневого типу - за допомогою поршня. Теплообмінник поділяється за типами теплообміну, при якому газ високого та низького тиску протікають різними шляхами, і за типами теплонакопичувача, при якому газ високого та низького тиску по черзі протікають по одному шляху. Поєднуючи ці агрегати, в даний час доступно кілька систем циркуляції газу, які називаються Stirling, GM (Gifford McMahon), Solvey і Velmire. Серед них охолоджувач Стірлінга є найбільш відповідним для охолодження інфрачервоного детекторного елемента, оскільки він простий за структурою і легко зменшує його розмір і вагу. Недоліки, такі як

сильна вібрація та короткий термін служби, нещодавно значно покращились, тому цей спосіб охолодження зараз широко використовується.

## **1.5. ЗАСТОСУВАННЯ ДЕТЕКТОРІВ ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**

### **1.5.1. ОПТИЧНІ ЛІЧИЛЬНИКИ ПОТУЖНОСТІ**

Оптичні лічильники потужності використовуються для вимірювання інтенсивності світла і знаходять широкий спектр застосувань, таких як оптичний волоконний зв'язок та лазери. Оптичні волоконні комунікації класифікуються на короткі, середні та міжміські системи зв'язку. Для систем оптичного зв'язку на великі відстані використовуються інфрачервоні промені в області довжин хвиль від 1,3 мкм до 1,5 мкм, які забезпечують менші втрати на передачу оптичного волокна. PIN-фотодіоди InGaAs використовуються у вимірювачах втрат оптичного волокна, потужності лазера, в якості реле, тощо. Основними характеристиками вимірювача оптичної потужності є лінійність та однорідність. Іноді для зменшення рівня шуму використовують детектор охолоджуваного типу, завдяки чому світло низької потужності можна виміряти за низького рівня шуму.

### **1.5.2. ЛАЗЕРНІ ТЕЛЕВІЗОРИ**

Вихідний рівень і довжина хвилі випромінювання лазерного діода (LD) змінюються залежно від температури. Для стабілізації LD виконується автоматичне регулювання потужності. Воно включає два методи: один полягає у відстеженні інтегрованої кількості світлових імпульсів від LD, а в іншому - відстеження пікового значення світлових імпульсів. З розвитком LD високої потужності висока лінійність стала важливою для контролю світлових імпульсів. У методі моніторингу пікового значення світлових імпульсів також потрібна швидша реакція. PIN-фотодіоди InGaAs монтуються або в тому ж корпусі, що і LD, або поза корпусом через оптичну систему. Крім того, як лазери InAs, так і InSb використовуються для лазерів з більшою довжиною хвилі.

### 1.5.3. ТЕРМОМЕТРИ ВИПРОМІНЮВАННЯ

Об'єкти випромінюють інфрачервоне випромінювання на основі власних температур, якщо вони перевищують абсолютну нульову температуру. Насправді кількість інфрачервоних променів, що випромінюються від об'єкта, не обов'язково визначається залежно від температури. Випромінювальна здатність  $\epsilon$  повинна бути компенсована. У випадку чорного тіла  $\epsilon = 1$ . Оскільки випромінювальна здатність  $\epsilon$  визначається температурою та довжиною хвилі об'єкта, слід бути обережним при вимірюванні абсолютної температури об'єкта.

Детектори, що використовуються для термометрів випромінювання, повинні вибиратися, виходячи з температури та матеріалу об'єкта, що підлягає вимірюванню. Наприклад, скло має пікову довжину хвилі випромінювання  $\epsilon$  близько 5 мкм, а пластикові плівки близько 3,4 мкм або 8 мкм. Отже, для цих об'єктів необхідно вибрати детектори, чутливі до таких областей довжини хвилі. Крім того, в результаті нещодавніх розробок в інфрачервоних волокнах, інфрачервоні детектори в поєднанні з інфрачервоними волокнами використовуються в різних сферах застосування, включаючи вимірювання температури гарячих металів та інших об'єктів, які обертаються, мають складну внутрішню структуру і знаходяться в середовищах, таких як вакуум і газу високого тиску.

### 1.5.4. ВИЯВЛЕННЯ ПОЛУМ'Я

Детектори полум'я використовуються для виявлення світла, яке випромінює вогонь, і для спостереження за тим, як відбувається процес горіння. Випромінювання, яке надходить від полум'я, широко розподіляється від УФ-області до інфрачервоної області (рис 1.11). Методи виявлення включають використання фотопровідного детектора PbS для виявлення інфрачервоного світла, використання двоколірного детектора для виявлення широкого спектра від УФ-області до інфрачервоної області та використання PbSe та піроелектричних детекторів для виявлення довжини хвилі 4,3 мкм.

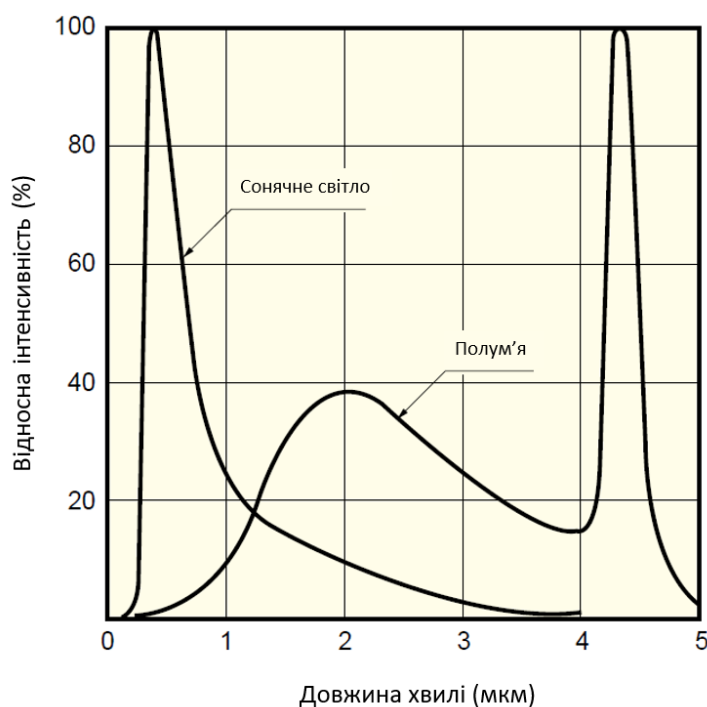


Рисунок 1.11 – Випромінювання від полум'я

### 1.5.5. АНАЛІЗАТОРИ ВОЛОГИ

Аналізатор вмісту води або вологи використовує довжини хвиль 1,1 мкм, 1,4 мкм, 1,9 мкм, 2,7 мкм, які поглинаються вологою в інфрачервоній області. Світлові промені на цих довжинах хвиль і еталонної довжини хвилі випромінюються від рослин або вугілля, а аналізатор вологи приймає відбите або пропущене світло від об'єкта і обчислює відношення до еталонної довжини хвилі світла для вимірювання вологи. PIN-фотодіоди InGaAs та фотопровідні детектори PbS найбільш відповідають для аналізаторів вологи.

### 1.5.6. ГАЗОАНАЛІЗАТОРИ

Газоаналізатори використовують поглинання газів в інфрачервоній області і вимірюють щільність газу. Існує два методи, які називаються дисперсійним та недисперсним методами. Дисперсійний метод спектроскопічно розділяє інфрачервоне світло, що випромінюється від джерела світла, на спектри і використовує їх поглинаючі характеристики для вимірювання інгредієнтів та кількості вимірюємого газу. Недисперсний метод вимірює лише характеристики поглинання, але використовується дещо частіше, ніж дисперсійний метод.

Наприклад, недисперсні інфрачервоні газоаналізатори використовуються для вимірювання вихлопних газів автомобіля (CO, HC, CO<sub>2</sub>), впускного газу (CO<sub>2</sub>), контролю викидів (CO, SO, NO<sub>2</sub>), витоків палива (CH<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>) та так далі. Аналізатори інгредієнтів використовують для вимірювання CO<sub>2</sub> (4,3 мкм) та сахарину (3,9 мкм) у газованих напоях (безалкогольних напоях, пиві тощо).

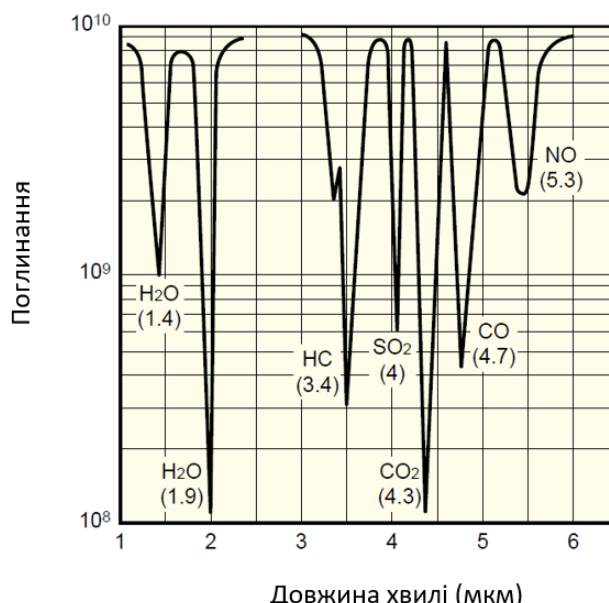


Рисунок 1.12 – Типові спектри поглинання різних газів

### 1.5.7. ІНФРАЧЕРВОНІ ПРИСТРОЇ ФОРМУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ

Розробка приладів інфрачервоної візуалізації класифікується на 1, 2 і 3 покоління в процесі розробки (рис 1.13). У 1-му поколінні, оскільки використовується лише один детекторний елемент, оптична система повинна обертатися навколо осей X та осі Z для створення зображення. У 2-му поколінні використовується лінійний масив (1D-масив), тому оптичній системі залишається лише обертатися навколо осі Z. У 3-му поколінні використовується масив площ (2D-масив), так що немає необхідності сканувати інфрачервоне зображення за допомогою оптичної системи (рис 1.13(с)). Якщо для пристрою інфрачервоного зображення використовується масив елементів, його оптичну систему можна спростити, завдяки чому пристрій стає компактним і легким. Однак характерна різниця між кожним елементом може бути проблемою. Пристрій інфрачервоної

візуалізації використовується в широкому спектрі застосувань у галузях промисловості, медицини та науки.

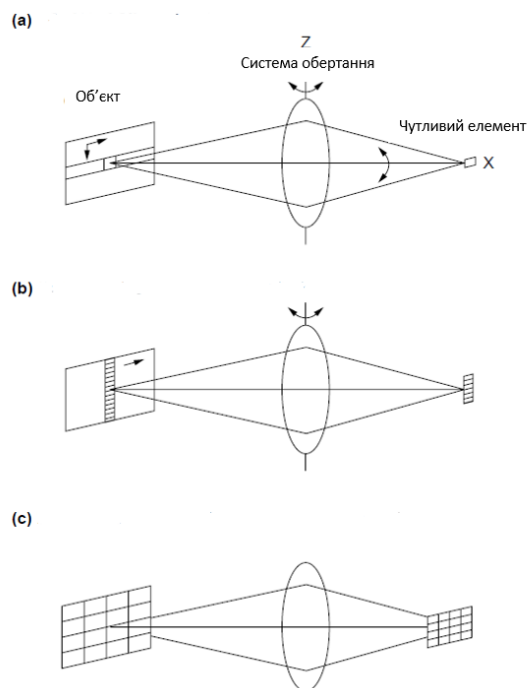


Рисунок 1.13 – Схематична діаграма інфрачервоного пристрою формування зображень. (a) – сканування за допомогою одного елемента, (b) – сканування одновимірним детектором, (c) – сканування двовимірним детектором.

### 1.5.8. ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ

Об'єкти випромінюють або відбивають світло, і таке світло включає різну інформацію, залежно від довжин хвиль. Вимірюючи кожен довжину хвилі, можна отримати конкретну інформацію про об'єкти. Інфрачервоне дистанційне зондування дозволяє отримати більш конкретну інформацію, таку як температура поверхні твердих тіл та рідини, типи та температури газів тощо. Зокрема, з ростом використання дистанційного зондування космічними супутниками та літаками в останні роки, ми тепер можемо отримувати макроскопічну інформацію, таку як температура суші та морської води, концентрація газу в атмосфері тощо. Така інформація використовується для метеорологічних спостережень, моніторингу забруднення навколишнього середовища, виявлення ресурсів та іншого.

### 1.5.9. СОРТУВАЛЬНІ ПРИСТРОЇ

Використовуючи довжину хвилі поглинання, властиву органічній речовині, можна сортувати сільськогосподарські культури (такі як картопля, помідори, цибуля та часник) від грудок та каменів. Для такого сортування використовуються PIN-фотодіоди InGaAs та фотопровідні детектори PbS. Крім того, ці детектори використовуються для сортування продукції на стрічковому конвеєрі заводу, виявляючи різницю температур, емісійності та пропускання.

### 1.5.10. ВИЯВЛЕННЯ ПРИСУТНОСТІ ЛЮДИНИ

- Детектор вторгнення

Коли детектується температура тіла, що рухається, цей пристрій видає попереджувальний сигнал. Інфрачервоне випромінювання, яке випромінює зловмисник, збирається детектором за допомогою дзеркала або лінзи Френеля. Для того, щоб покрити широкий кут використовується багатоповерхове дзеркало або лінза Френеля. Якщо швидкість, з якою рухається людина, перетворити на частоту, вона становить приблизно 0,3 Гц при звичайній ходьбі і близько 10 Гц у випадку бігу.

Температура, що виділяється з людського тіла, може змінюватися залежно від одягу та пори року і коливається від 20 до 30°C (табл). Це відповідає випромінюванню чорного тіла, що має пік 9,5 мкм.



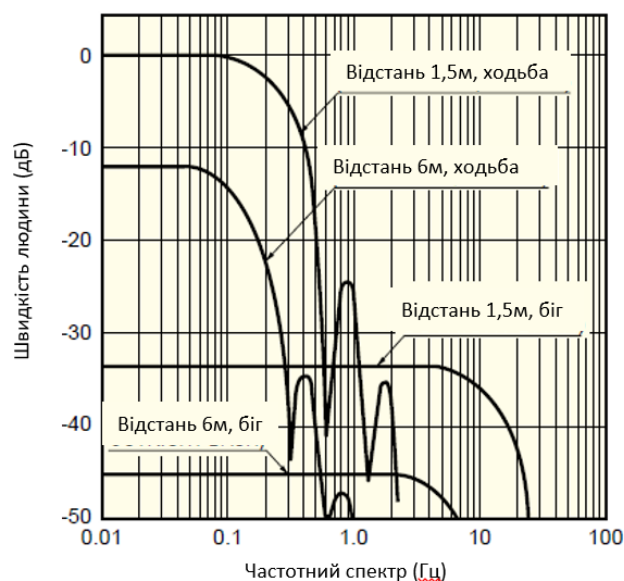


Рисунок 1.14 – Залежність частоти випромінювання від швидкості людини

Таблиця 1.3 - Температура людського тіла

	Зимній одяг	Літній одяг
Обличчя	31,2°C	32,0°C
Потилиця	23,4°C	30,9°C
Грудна клітина	20,9°C	29,3°C
Спина	20,9°C	29,0°C
Шлунок	22,2°C	22,2°C
Пояс	20,4°C	31,0°C
Стегно	21,3°C	28,6°C
Гомілка	21,3°C	28,4°C

- Автоматичні вимикачі світла

Коли людина потрапляє в темне місце, цей пристрій виявляє вхід людини і вмикає світло. Принцип роботи цього пристрою такий же, як у пристрою сигналізації про вторгнення.

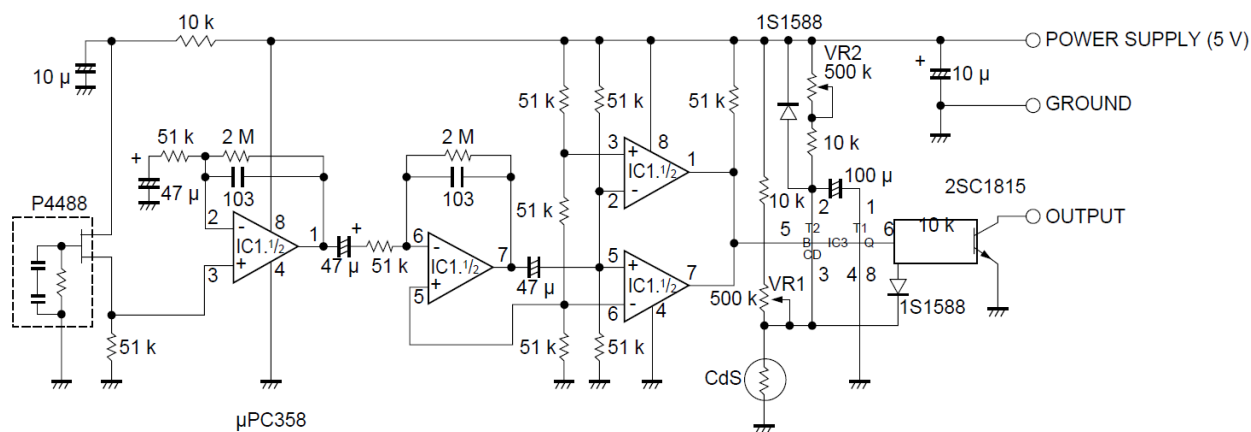


Рисунок 1.15 – Приклад схеми для вимикача світла

- Автоматичні двері

Піроелектричні інфрачервоні детектори також використовуються для пасивного типу автоматичного відкривання дверей. У порівнянні з активним ультразвуковим типом це вигідно, оскільки його конфігурація схеми проста, що забезпечує низьку вартість системи.

### 1.5.11. СПЕКТРОФОТОМЕТРИ

Дисперсійні спектрофотометри звичайно стали популярними, але останнім часом застосовується інфрачервона спектрофотометрія з перетворенням Фур'є (FT-IR). У спектрофотометрії FTIR інтерференційний сигнал, отриманий за допомогою двопроменевого інтерферометра, зазнає перетворення Фур'є, за допомогою якого сигнал розкладається на спектр. Цей метод має такі особливості:

1. Кілька спектральних елементів одночасно вимірюються з високим коефіцієнтом шуму.
2. Висока точність довжини хвилі завдяки визначенню довжини хвилі лазерного світла.
3. Корисно в інфрачервоній області, де освітленість джерела світла низька, а високочутливі детектори, такі як фотопомножувачі, недоступні.

Інфрачервоні детектори, що використовуються як серцевина спектрофотометрів FT-IR, повинні мати такі характеристики.

- Широкий діапазон спектральної реакції
- Висока чутливість

- Велика активна площа, достатня для задоволення яскравих оптичних систем
- Широкочастотна смуга пропускання
- Хороша лінійність щодо широкого рівня падаючого світла.

Теплові детектори в основному використовуються в широкій області довжин хвиль від 2,5 до 25 мкм. Для вимірювань, що вимагають високої чутливості та високошвидкісної вибірки або використання невеликих кількостей зразків, використовуються фотопровідні детектори МСТ (HgCdTe) та фотоелектричні детектори InSb.

#### Висновки:

В даному розділі розглянуті основні дані про інфрачервоні фотодетектори. Для вирішення працюючої техніки на фоні навколишнього середовища, найбільш оптимальним може служити діапазон чутливості телевізійної техніки 2,5 – 5,0 мкм. Найбільш відповідним матеріалом для вирішення поставленої задачі є монокристалічний InSb, до того ж технологія отримання монокристалічних платівок з цього матеріалу на сучасному етапі найбільш опрацьована в порівнянні з найближчим конкурентом по властивостям – КРТ (Cd,Hg,Te).

## 2. ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ФОТОДІОДІВ

В історичному аспекті дифузійний спосіб виготовлення InSb фотодіодів був домінуючим, починаючи з кінця 50-х років минулого століття. Ситуація змінилась з появою роботи [4], де повідомлялось про виготовлення фотодіодів методом іонної імплантації берилію та магнію в n-InSb. Основні технічні параметри імплантаційних фотодіодів було порівняно з дифузійними. Після чого почалося широке використання іонної імплантації для виготовлення InSb фотодіодів. Потрібно підкреслити, що іонна імплантація берилію вимагає високої технологічної культури, спеціально обладнаних приміщень та дотримання жорстких вимог техніки безпеки, оскільки пара берилію є сильно токсичною речовиною. У Китаї, Ірані, Туреччині та інших державах, які впродовж останніх десятиріч створюють власний технологічний цикл виробництва InSb фотодіодів та фокальних матриць на їх основі, дифузійний та імплантаційний способи знаходяться у паритетному співвідношенні. Цей факт пов'язаний не в останню чергу з тим, що отримані у 60-х роках дифузійним способом InSb фотодіоди мали технічні параметри, які були не гірші, ніж у фотодіодів, виготовлених пізніше методом іонної імплантації. Зокрема, у цих фотодіодах було досягнуте дифузійне обмеження темнового струму і тепловий шум Джонса–Найквіста, тоді як у фотодіодах, виготовлених за технологією іонної імплантації, переважав генераційно-рекомбінаційний механізм проходження струму і дробовий шум. Суттєвою перевагою дифузійної технології є можливість виготовлення переходів з глибиною залягання значно більшою ніж 1 мкм, характерною для методу іонної імплантації. Це дозволяє збільшити товщину фокальних матриць, які гібридизуються з кремнієвими системами зчитування, що підвищує їх механічну міцність, зменшує процент відбракованої продукції і збільшує ресурс роботи. У симетрично легованих дифузійних переходах фоточутливість визначає як р-, так і n-область переходу, тоді як у виготовлених методом імплантації – переважно n-область. Дифузійний спосіб виготовлення фотодіодів дозволяє реалізовувати технологічний процес на групі підкладок InSb одночасно, а іонної імплантації – лише на одній підкладці. Важливою перевагою дифузійного способу є також

можливість розділення електричної межі p-n переходу з металургійною шляхом розгонки легуючої домішки, що покращує якість переходу. При дифузійному способі виготовлення фотодіоди не потребують додаткових термовідпалів. У разі іонної імплантації берилію процес виведення електричної межі переходу із зони радіаційних дефектів значно утруднений зв'язком профілю легуючої домішки берилію з профілем радіаційних дефектів. Крім того, використання дорогого технологічного обладнання у сукупності з жорсткими вимогами до технічної безпеки проведення робіт з берилієм суттєво впливає на вартість кінцевого виробу. Тому дифузійний спосіб виготовлення InSb фотодіодів залишається конкурентоздатним відносно іонно-імплантаційного. Важливою проблемою у виготовленні низькофонових InSb фотодіодів є присутність надлишкових темнових струмів, які перевищують генераційно-рекомбінаційний струм в області просторового заряду (ОПЗ). Як правило, надлишкові струми мають об'ємну та поверхневу складову і зумовлюють шум 1/f-типу, що зменшує виявлювальну здатність фотодіодів. Актуальним залишається аналіз можливих причин виникнення тунельних струмів у фотодіодах, виготовлених дифузійним способом.

## **2.1. ПРОГНОЗУВАННЯ ДІАПАЗОНУ ЗУПИНКИ ІОНІВ ПРИ ІМПЛАНТАЦІЇ В INSb**

Взаємодія імплантованих іонів з атомами в підкладці є складною. При проходженні іона крізь поверхню відбуваються кулонівські зіткнення та електронно-обмінні/кореляційні взаємодії. Для будь-якого фіксованого набору параметрів імплантації розподіл імплантованих іонів буде статистичним поширенням навколо середнього значення. Форма цього розподілу схожа на гаусів розподіл, але з асиметрією і ексцесом.

Джеймс Ф. Зіглер розробив програмне забезпечення, яке називається SRIM (The Stopping Range of Ions in Matter). SRIM - це набір програмних пакетів, які намагаються передбачити діапазон зупинки будь-якого іона в будь-якому матеріалі, використовуючи алгоритм Монте-Карло. Розрахунки, проведені цим програмним забезпеченням, статистично засновані на оптимізації швидкості, і використовують основні теорії в поєднанні з відповідними параметрами для відповідності експериментальних даних, якщо вони є. Це найбільш широко використовуваний інструмент моделювання для іонної імплантації. Багатоелементні матеріали (такі як InSb) розглядаються як суміш його складових атомів, а не як молекулярна або кристалічна структура. Деякі багатоелементні матеріали, такі як SiO<sub>2</sub>, існують у базі даних SRIM; InSb не є одним з цих матеріалів.

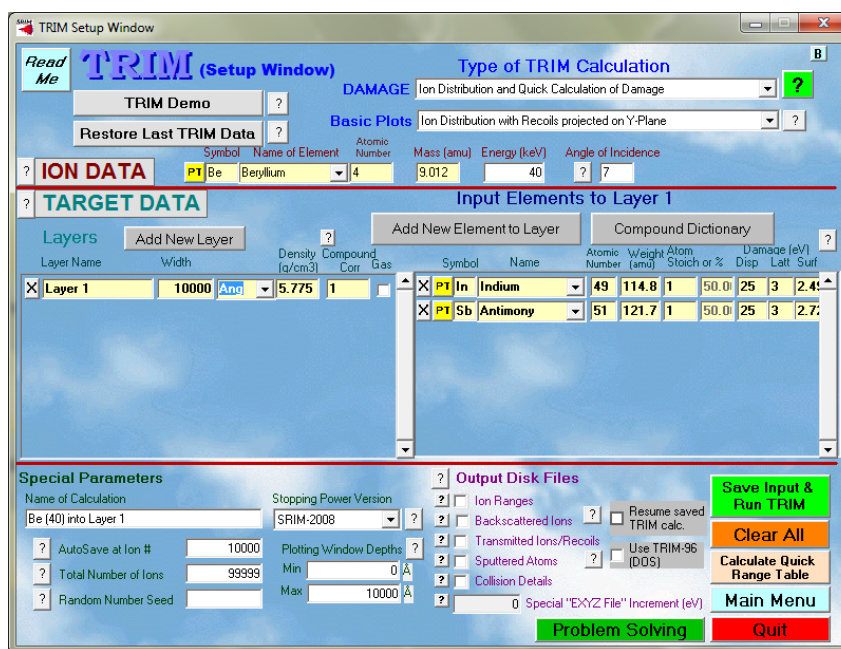


Рисунок 2.1 - Інтерфейс вхідних параметрів для TRIM, програмний пакет в рамках SRIM, що використовується для розрахунків іонної імплантації.

Вхідні параметри включають елемент, який імплантується, його енергію, матеріал(и) підкладки, кут підкладки (градуси від нормального падіння до пучка) і щільність підкладки.

Елемент імплантату, який нас цікавить, - це Ве (рис. 2.2), домішка р-типу в InSb. Ве є хорошим імплантатом, оскільки атом має малу масу. Іонна імплантація призводить до пошкодження структури решітки пластин, що негативно впливає на електричні характеристики; InSb особливо сприйнятливий до пошкодження імплантації, оскільки він є м'яким матеріалом; Твердість Кноор для InSb становить  $220 \text{ кг/мм}^2$  порівняно з  $1150 \text{ кг/мм}^2$  для Si. Щоб мінімізувати це пошкодження, краще використовувати атоми легуючих домішок з малою масою.

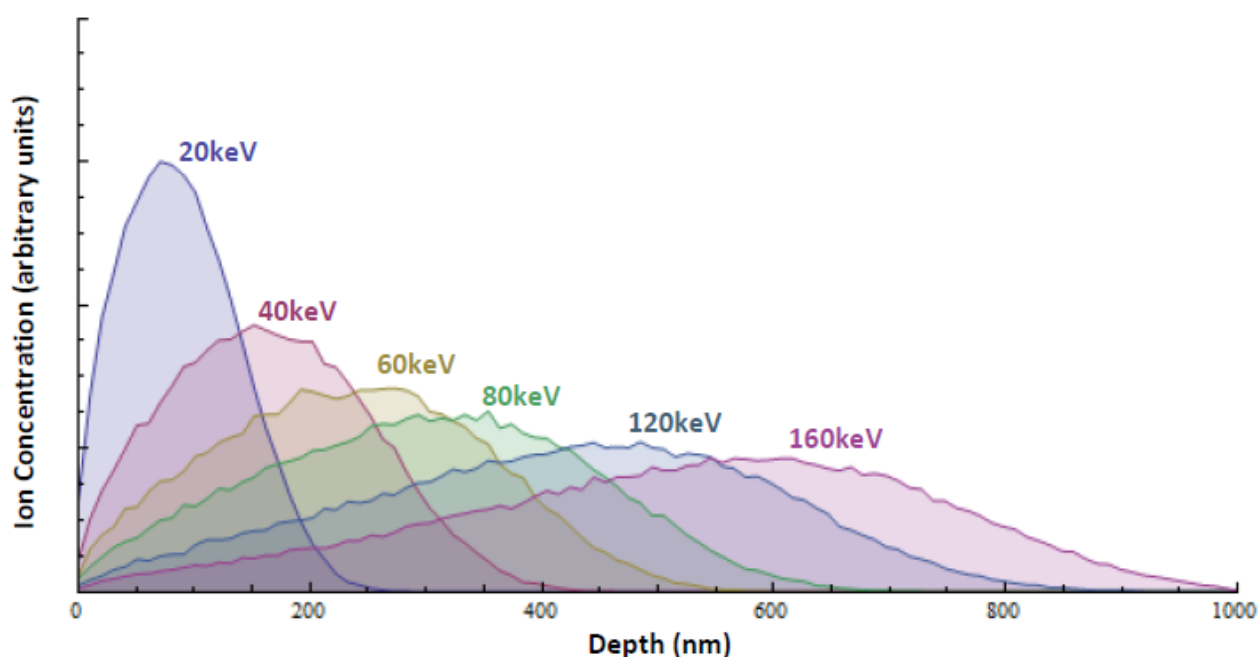


Рисунок 2.2 - Розраховані за допомогою програми TRIM профілі розподілу Ве у підкладці з InSb

## 2.2. ВИМІРЮВАННЯ ПРОФІЛЮ РОЗПОДІЛУ ВЕ, ІМПЛАНТОВАНОГО INSB. МАСС-СПЕКТРОМЕТРІЯ ВТОРИННИХ ІОНІВ (SIMS)

У SIMS використовується бомбардування іонів для розпилення поверхні зразка. Оскільки поверхня розпилюється, вибиваються вторинні іони легуючої домішки, які збираються через мас-спектрометр для визначення концентрації як функції від глибини.

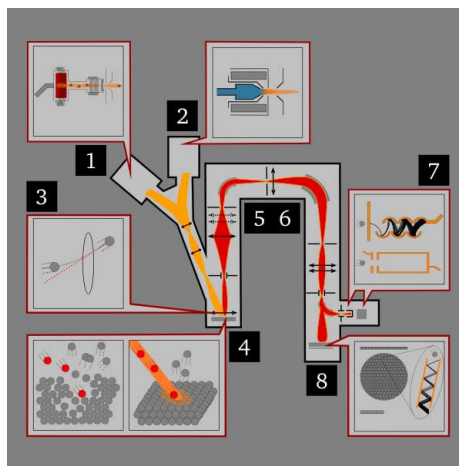


Рисунок 2.3 - Схема загального інструменту SIMS

Загальна схема інструменту SIMS зображена на рисунку 2.3. Іони для бомбардування постачаються іонною пушкою (1 або 2). Найпоширенішим способом подачі іонів є електронна іонізація газів, таких як Ar і O. Хоча технічно будь-який іон може бути використаний для цієї техніки, певні іони будуть працювати краще для конкретних вимірювань. Be є електропозитивним елементом, тобто Be може втратити електрон і утворити позитивний іон. Для електропозитивних елементів встановлено, що кисень забезпечує найбільшу ймовірність вторинної іонізації вибитих атомів. Це важливо, оскільки тільки іонізовані атоми можуть бути прискорені від зразка і виміряні на виході. Через це джерело іонів кисню забезпечить найкращу чутливість для виявлення Be. Іони кисню прискорюються від джерела і фокусуються на підкладці (3 і 4). Атоми з підкладки розпилюються і деякі з них іонізуються. Потім іонізовані атоми прискорюються в сторону іонних лінз. Ці лінзи фокусують вибиті атоми в пучок, який потім направляється до мас-спектрометру, щоб відокремити іони Be від іонів In та Sb. Відокремлені іони Be потім збирають або електронним помножувачем (7 зверху), чашкою Фарадея (7 дном), або ПЗЗ екраном (8). Метод SIMS вимірює кількість іонів Be як функцію від часу в процесі розпилення. Коли вимірювання завершено, використовується профілометр для сканування розпиленої траншеї і вимірювання її глибини. Потім кількість іонів на одиницю часу перетворюється



на кількість іонів на одиницю товщини (глибини). Точне перетворення з часової області в товщину покладається на кілька умови:

- швидкість розпилення підкладки повинна бути постійною протягом усього процесу;
- розпилювана область повинна залишатися в тому самому точному місці;
- ймовірність іонізації легуючої домішки повинна залишатися постійною протягом усього процесу.

Якщо будь-яке з цих умови не буде виконуватись, то достовірність вимірюваного профілю буде низькою.

Висновки:

У цьому розділі узагальнено літературні дані з технології InSb фотодіодів, виготовлених методом іонної імплантації берилію в підкладки n-InSb. Низька температура плавлення InSb (803 K), а також наявність певної критичної температури (593 K), при якій відбувається сублімація Sb з поверхні підкладки – накладають певні температурні обмеження на використання дифузійного способу виготовлення. Саме тому вирішено було використовувати метод іонної імплантації. Але при цьому способі виготовлення фотодіоди потребують додаткові термовідпали.

### 3. РОЗРОБКА ФОТОДІОДУ

#### 3.1 КОНСТРУКЦІЯ, ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАННЯ ВАХ ФЧЕ, ОТРИМАНИХ НА І ЕТАПІ.

На першому етапі виконання роботи були виготовлені зразки ФЧЕ з наступними конструктивно-технологічними особливостями:

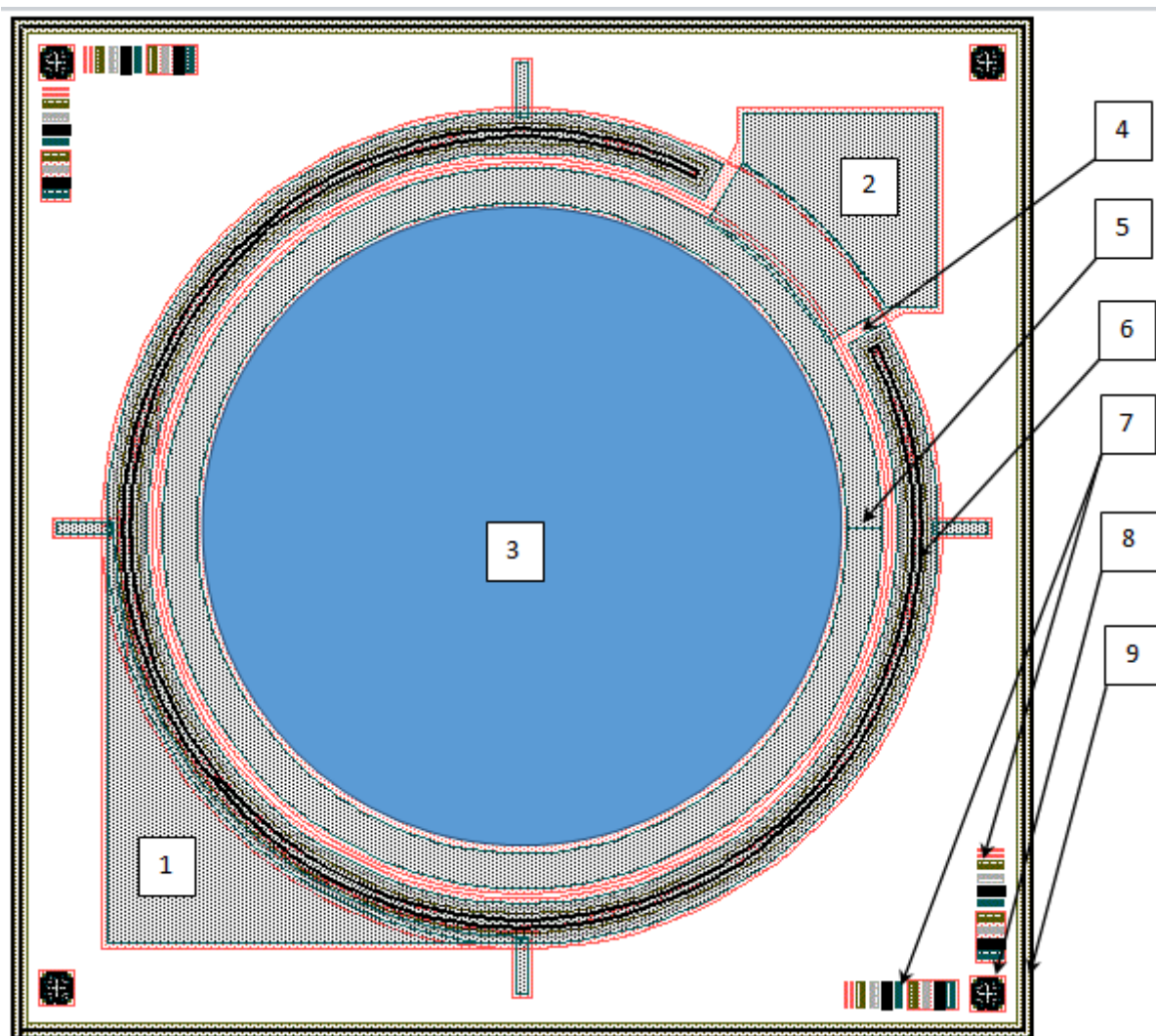


Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд кристалу:

1. Контактна область катоду фотодіода;
2. Контактна область аноду фотодіода;
3. Активна область аноду фотодіода ( $\varnothing 1,30\text{мм}$ )
4. Охоронне кільце;
5. Омічний контакт до аноду фотодіода;
6. Омічний контакт до катоду ФД;

7. Знаки контролю лінійних розмірів (КЛР) в топологічних шарах;
8. Знаки суміщення фотолітографічних шарів ;
9. Зона скрайбування платівки на кристали (20 мкм/ст.).

Розмір кристалу – 2,04×2,04мм.(відповідно до розміру відтворюваного аналогу фотодіоду ФД3645).

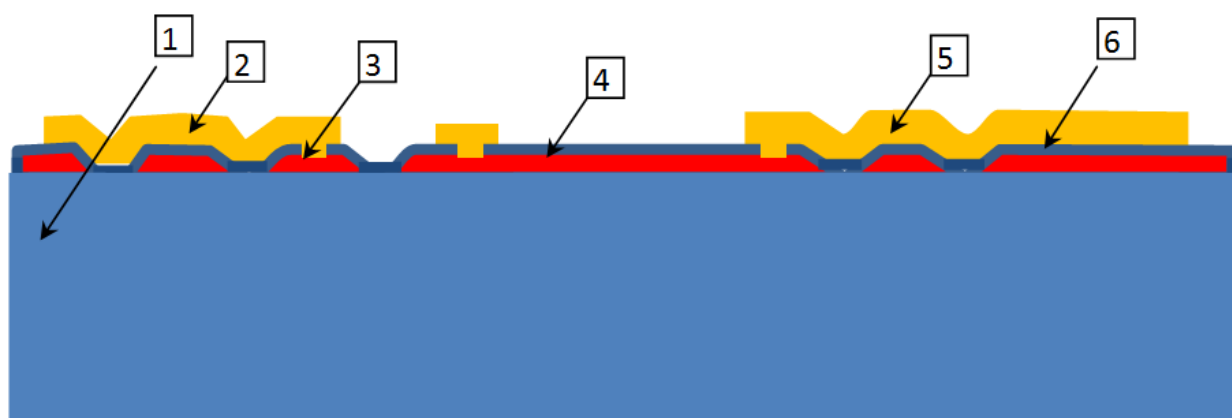


Рисунок 3.2 – Переріз кристалу фоточутливого елементу:

1. –платівка n-InSb [фірма «Galaxy» Ø56 мм n-InSb (легування Te),  $n_e=(0,6\div0,8)E14\text{ см}^{-2}(111)B$ ];
2. – металізація катоду ФД та охоронного кільця [Ti-4nm+Au-200nm; фотолітографія – «lift off»];
3. – меза-структура охоронного кільця ФД р- типу провідності [тотальна імплантація  $Be^+$  : енергія 40кеВ, доза  $1\cdot10^{14}\text{ см}^{-2}$  через маску  $SiO_2$  висотою 220nm; двостадійний швидкий термічний відпал:  $T=280^{\circ}C$ , 120 секунд +  $T=380^{\circ}C$ ,10 секунд в Аргоні (нагрів  $-10^{\circ}C/сек$ ; охолодження –  $2.5^{\circ}C/сек$ )];
4. – меза-структура аноду фотодіода р- типу провідності [глибина шару р- типу провідності – 0.4мкм; глибина МЕЗИ – 1.2мкм, який отриманий за допомогою травлення платівки в травнику складу  $47\%HF:10\%(COOH)_2:98\%H_2SO_4:30\%H_2O_2=16:7:16:1$  з маскою фоторезисту];
5. – металізація аноду ФД;

6. – захисне покриття ФД [шар оксиду кремнію товщиною 200nm, отриманий методом плазмохімічного осадження  $\text{SiH}_4 + \text{N}_2\text{O}$ ].

Виготовлені зразки досліджувались для отримання вольт-амперних характеристик на приладі для спостереження характеристик транзисторів -Л256 (рис. 3.3) та на інтегральну фоточутливість в ЦКТБ «Ритм» (м. Чернівці) на макетній установці (табл 3.1).

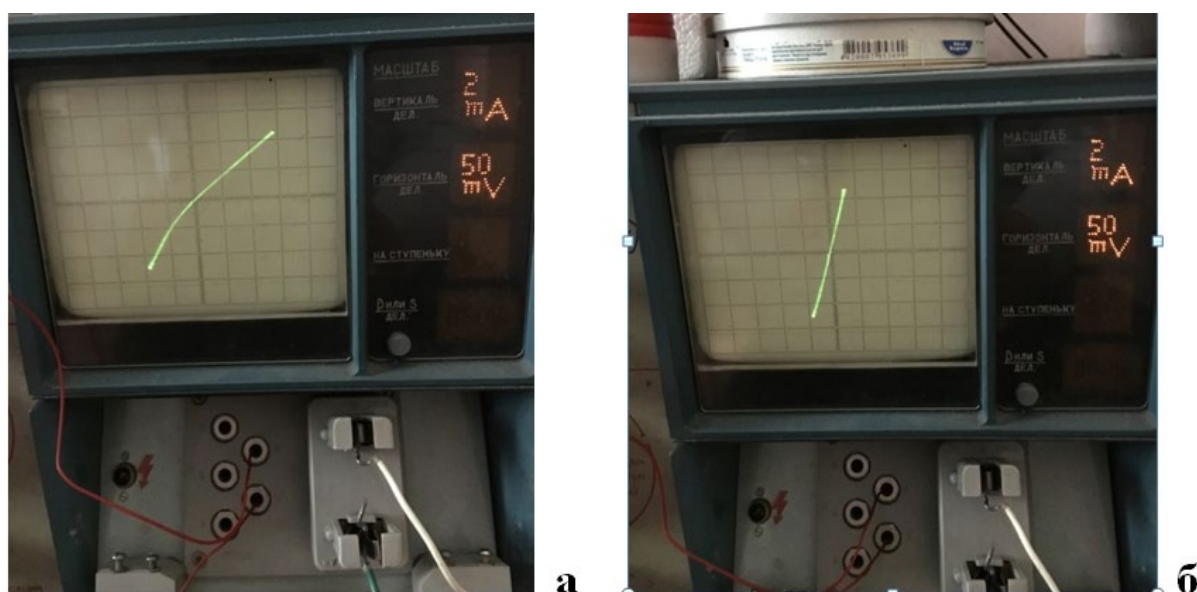


Рисунок 3.3 – ВАХ фотодіода при  $T=77\text{K}$  (а) і при  $T=300\text{K}$  (б)

Таблиця 3.1:

Найменування параметра	Значення параметра
Форма модуляції потоку випромінювання	Синусоїдальна, частота модуляції потоку $f=800\text{Гц}$
Спектральний діапазон випромінювання	Інтегральний потік від АЧТ з температурою випромінюючого тіла $T=500\text{K}$

Продовження таблиці 3.1:

Умови вимірювань	ФЧЕ охолоджувався до температури рідкого азоту		
Номер партії виготовлення ФД	1	2	3
Усереднена Чутливість, А/Вт	0.0 7	0.1 2	0.11

Також досліджувалась якісні характеристики фоточутливості ФД до впливу інфрачервоного випромінення, яий був утворений макетним джерелом (рис. 3.4)



Рисунок 3.4 – Макетне джерело опромінення

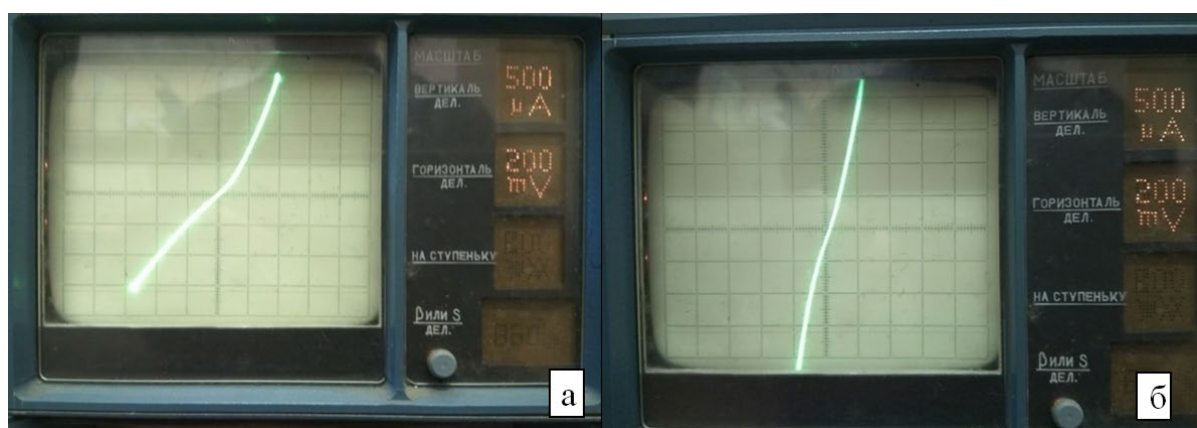


Рисунок 3.5 – Вольт-амперна характеристика ФД за температури  $T=77\text{K}$  без опромінення(а) та в умовах опромінення макетним джерелом (б)

Виходячи з цих графіків можна сказати, що отримані зразки мають як фотодіодний так і фоторезистивний характер.

За результатами аналізу вольт-амперної характеристики, конструкції та технології виготовлення фоточутливого елементу була запропонована фізична модель, що пояснює його фоторезистивність та низький динамічний опір зворотньоозміщеного р-n-переходу  $\sim 400\Omega$  (за нормативними документами цей параметр повинен бути не менше  $30K\Omega$ ).

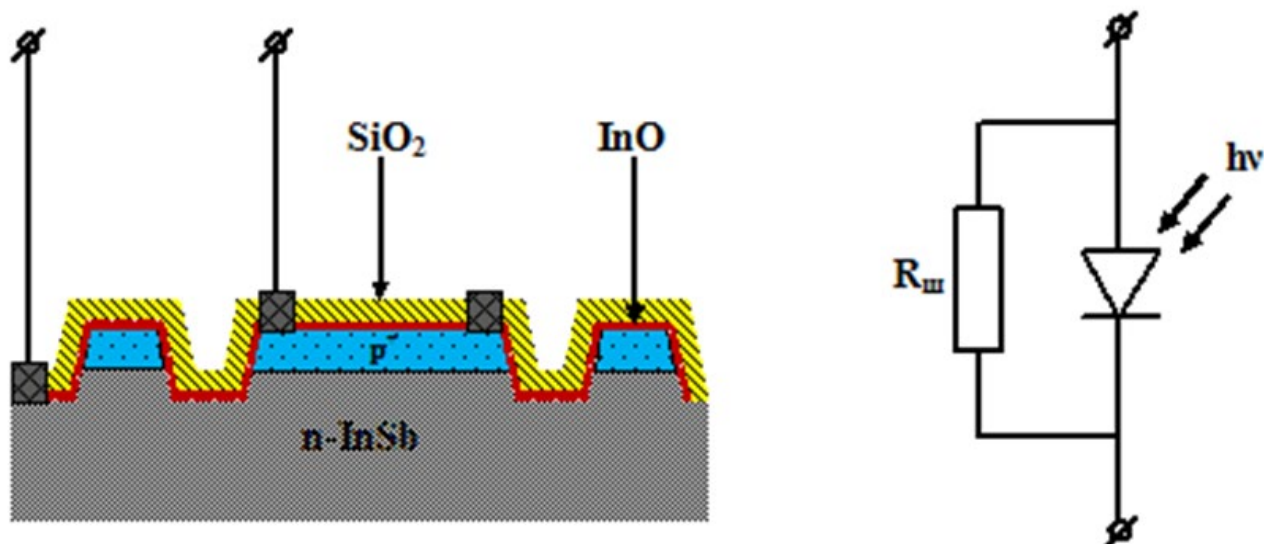


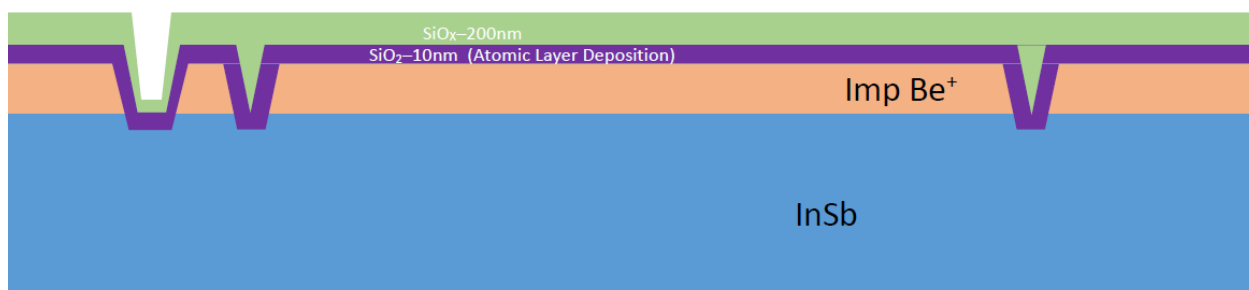
Рисунок 3.6 – Схематичний розтин виготовленого діода та його еквівалентна схема

В результаті аналізу отриманих даних, було зроблене припущення, що паразитний опір діода створюється провідною плівкою InO. Припущено, що ця плівка формується при нанесенні шару  $SiO_2$  в процесі PECVD осадження..

### 3.2 ДООПРАЦЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ФЧЕ, ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОДІОДІВ. АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ.

На основі висновків за результатами першого етапу роботи, було визначене рішення щодо припущення по першому етапу роботи. За наявності сучасних технологій формування пасивуючих покриттів, які не спричиняють окиснення платівки було запропоновано використання технології атомно шарового

нанесення плівок (ALD) за умов високого вакууму. Ця технологія має розв'язати проблему низького динамічного опору зворотньозміщеного рп-переходу фоточутливого елементу. Сутність пропозиції пояснюється нижче поданими



рисунках нижче:

Рисунок 3.7 – Переріз платівки ФЧЕ після формування шару  $\text{SiO}_2$  методом ALD за умов надвисокого вакууму

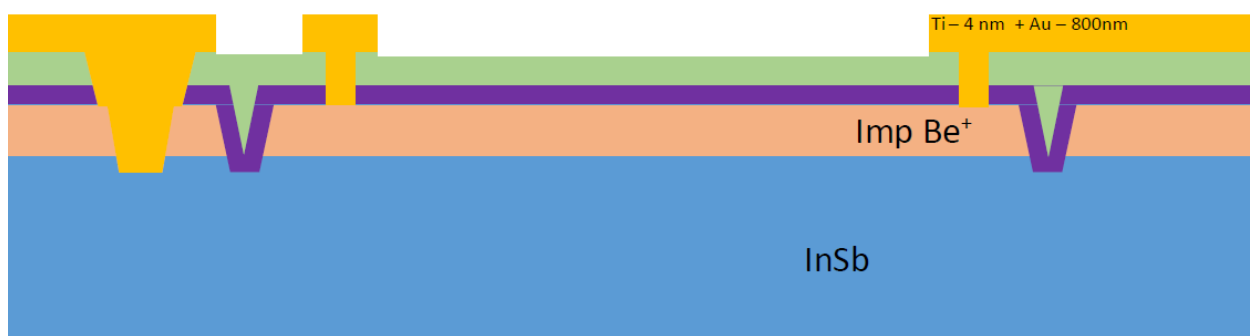


Рисунок 3.8 – Переріз кристалу ФЧЕ після всіх технологічних операцій

На виготовлених зразках фоточутливих елементів було проведено дослідження вольт-амперної характеристики та фоточутливості щодо впливу інфрачервоного випромінювання, яке утворене макетним джерелом.



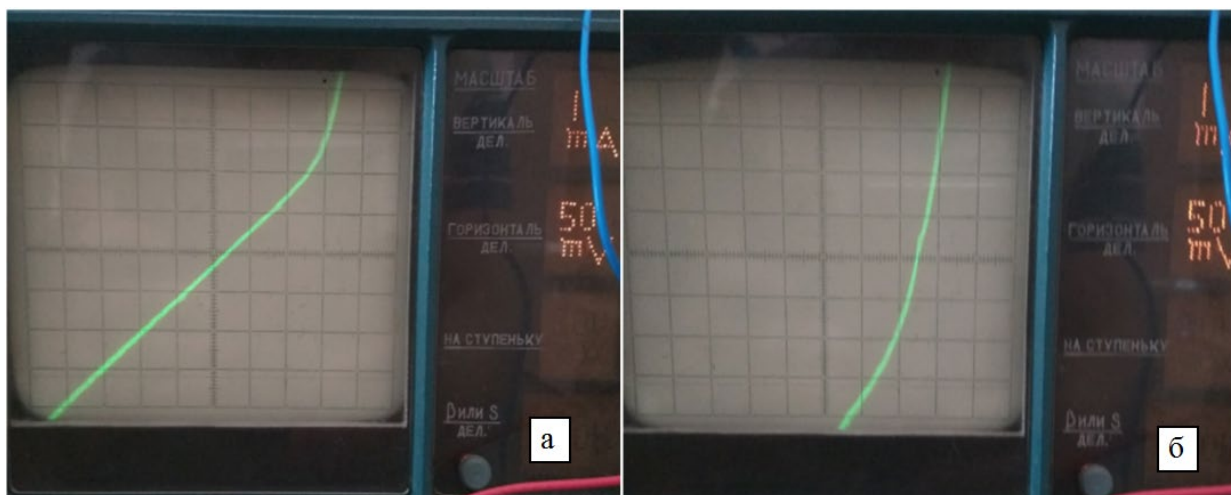


Рисунок 3.9 – ВАХ фотодіода при  $T=77K$  без опромінення(а) та в умовах опромінення макетним джерелом (б)

У порівнянні з першим етапом, можна побачити, що виготовлені зразки фоточутливих елементів мають фотодіодну залежність щодо впливу інфрачервоного опромінення макетним джерелом. Але за отриманими характеристиками можна побачити, що проблема низького динамічного опору зворотньоозміщеного рп-переходу залишилася невирішеною. За результатами аналізу було зроблене припущення, що отримані фоточутливі елементи мають великий струм витоку мілкового зворотньоозміщеного рп-переходу. Він спричинений великою кількістю дефектів структури після імплантування іонів Берилію дозою  $D = 1 \cdot 10^{14}$ . Також однією з причин може бути недостатній відпал анодної області фотодіоду в області ОПЗ.

### 3.3. КОРИГУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ, ПАРАМЕТРІВ СТРУКТУРИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ФЧЕ.

На даному етапі виконання роботи запропоновано технічне вирішення проблеми низького динамічного опору зворотньоозміщеного рп-переходу, пов'язане з:

- формуванням більш глибокого рп-переходу з міні допустимою дозою легування дозою іонів  $Be^+$  в області просторового заряду, що виникає при робочих режимах експлуатації фоточутливого елементу;



- доопрацюванням режимів відпалу платівок InSb після імплантації.

Крім того, зважаючи на відсутність в Україні обладнання для атомно шарового напорошення оксидованих покриттів (ALD), вирішено проводити пасивацію безпосереднього виходу рn-переходу на поверхню платівки InSb (з урахуванням зони просторового заряду) плівкою нітриду кремнію, отриманою методом PECVD з безкисневої парогазової суміші  $\text{SiH}_4 + \text{NH}_3$ . Для реалізації такого технічного рішення були розроблені та виготовлені додаткові фотошаблони:

- «Інтерфейс», що відкриває області кристалу фоточутливого елементу з виходом рn-переходу на поверхню;
- «Технологічні контактні вікна», для витравлення нітриду кремнію методами плазмохімічного травлення до «stop» шару оксиду кремнію в місцях контактних вікон з невеликим перекриттям на розсуміщення та розтрав технологічних шарів на фотолітографіях.

Сутність прийнятих технічних рішень ілюстрована в нижче наведених рис. розтинів кристалу в еволюційному процесі їх виготовлення:

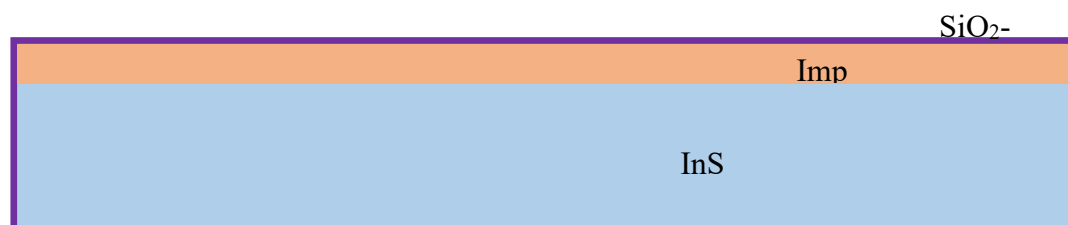


Рисунок 3.10 – Переріз платівки ФЧЕ після RTA

- платівка n- InSb [фірми «Galaxy» Ø56 мм InSb, n- типу провідності (легкування Te),  $n_e = (1,5 \div 2,0) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  (111)В];
- двостадійна імплантація іонів Берилію у режимах:  $E=30 \text{ кеВ}$ ,  $D=5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  та  $E=120 \text{ кеВ}$ ,  $D=6.25 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  через маску жертвенного шару окису кремнію товщиною 50нм;
- двостадійний швидкий термічний відпал легованої сторони в режимі:  $T=280^\circ\text{C}$ , 120с +  $T=380^\circ\text{C}$ , 10с у водороді (нагрів у режимі  $50^\circ\text{C/с}$ ; охолодження у режимі  $-2.5^\circ\text{C/с}$ ).



Рисунок 3.11 – Переріз платівки ФЧЕ перед контактною фотолітографією (КФЛ)  
«Меза»

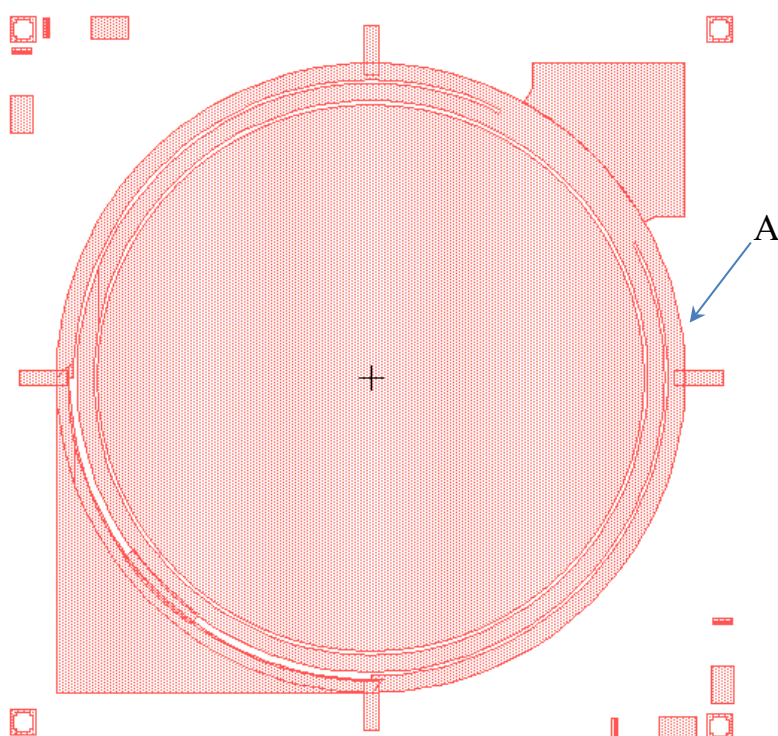


Рисунок 3.12 – Вид кристалу ФЧЕ на КФЛ «Меза» (заштриховані області покриваються фоторезистом)



Рисунок 3.13 – Переріз кристалу ФЧЕ після травлення платівки антимоніду індію в травнику складу  $47\% \text{HF} : 10\% (\text{COOH})_2 : 98\% \text{H}_2\text{SO}_4 : 30\% \text{H}_2\text{O}_2 = 16:7:16:1$  та зняття фоторезисту



Рисунок 3.14 – Переріз платівки ФЧЕ перед контактною фотолітографією «Інтерфейс»

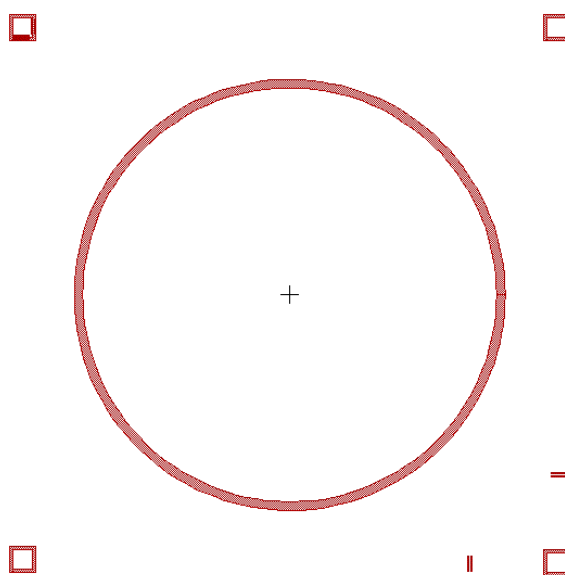


Рисунок 3.15 – Вид кристалу ФЧЕ на фотошаблоні «Інтерфейс» (заштриховані області на шаблоні світлі)

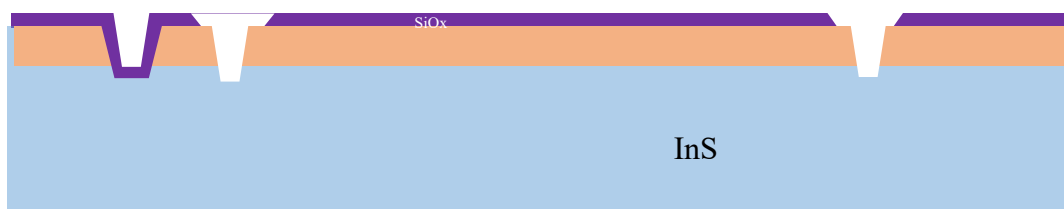


Рисунок 3.16 – Переріз платівки ФЧЕ після травлення  $\text{SiO}_2$  в областях «Інтерфейс» та зняття фоторезисту

Після цього етапу не допускається формування оксидів антимоніду індію в інтерфейсі пасивуючого діелектрика з InSb в областях безпосереднього виходу рп-переходу на поверхню платівки.

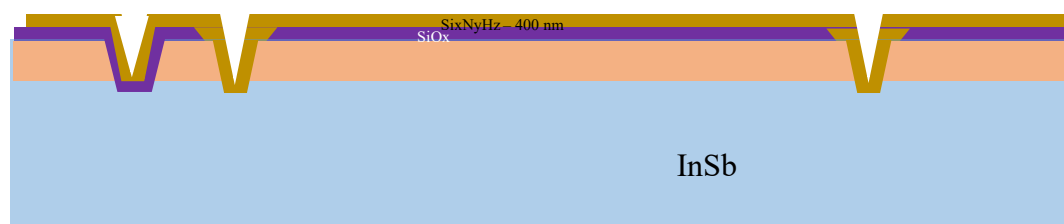


Рисунок 3.17 – Переріз платівки ФЧЕ перед контактною фотолітографією «Технологічні контактні вікна».  $\text{Si}_x\text{N}_y\text{N}_z$  формується методом плазмохімічного осадження суміші  $\text{SiH}_4 + \text{NH}_3$  за температури  $T = 300^\circ\text{C}$

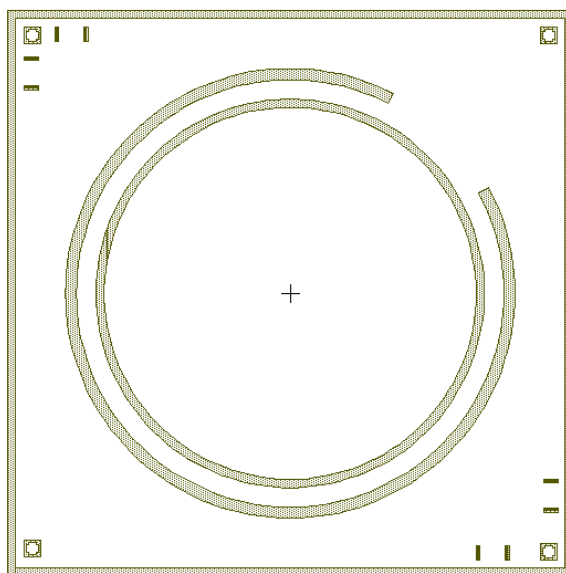


Рисунок 3.18 – Вид кристалу ФЧЕ на фотошаблоні «Технологічні контактні вікна» (заштриховані області на шаблоні світлі)

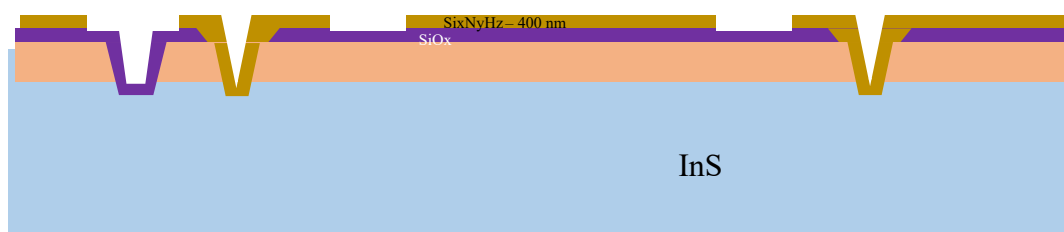


Рисунок 3.19 – Переріз платівки ФЧЕ після процесу PECVD  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в областях «Технологічні контактні вікна» до «stop» шару  $\text{SiO}_2$  та зняття фоторезисту

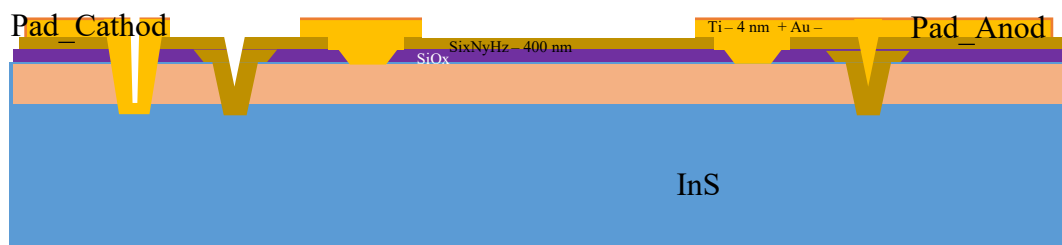


Рисунок 3.20 - Переріз платівки ФЧЕ після виконання всіх технологічних операцій по його формуванню

За запронованими технічними рішеннями була виготовлена платівка з кристалами ФЧЕ. Основні відмінності в технологічних операціях виготовлення третьої партії від першої та другої наведені в таблиці 3.1.

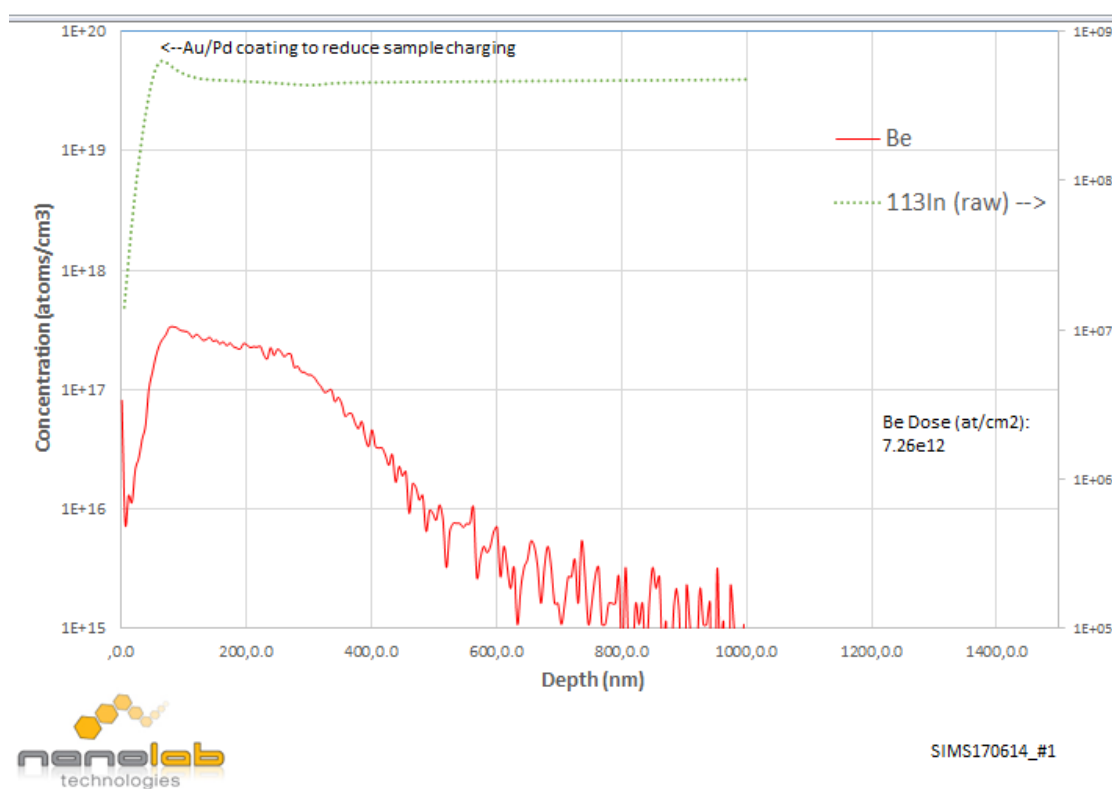


Рисунок 3.21 – Профіль легування  $\text{Be}^+$ , виміряний SIMS.

Таблиця 3.1

Відмінності в операціях виготовлення кристалів ФЧЕ на платівках													
Параметри	Номер партії	Концентрація електронів $n_e$ у висхідній платівці InSb при 77°K, $\text{cm}^{-2}$	Жертовний PECVD $\text{SiO}_2$ ( $\text{SiH}_4+\text{O}_2$ ), nm	Імплантація $\text{Be}^+ 1\text{ст.}$ $\text{D}(\text{cm}^{-2})$ ; $\text{E}(\text{KeV})$	Імплантація $\text{Be}^+ 2\text{ст.}$ $\text{D}(\text{cm}^{-2})$ ; $\text{E}(\text{KeV})$	RTA			Глибина рп-переходу, $\mu$	Глибина травлення мези, $\mu$	Товщина пасивуючого покриття над рп-переходом, nm		
						Атмосфера в термічній камері відпалу	Швидкість нагріву, $^{\circ}\text{C}/\text{sec}$	Швидкість охолодження, $^{\circ}\text{C}/\text{sec}$			ALD $\text{SiO}_2$	PECVD $\text{SiO}_2$	PECVD $\text{Si}_x\text{N}_y\text{H}_z$
	1	(0,6÷0,8)E14	175	$\text{D}=1\text{E}14;\text{E}=40^*$	-	Ar	10	2.5	0.4	1.2	-	200	-
	2	(0,6÷0,8)E14	50	$\text{D}=1\text{E}14;\text{E}=30$	$\text{D}=1\text{E}14;\text{E}=100$	Ar	10	2.5	0.4	1.2	10	400	-
	3	(1,5÷2,0)E15	220	$\text{D}=1\text{E}14;\text{E}=45$	$\text{D}=5\text{E}13;\text{E}=120$	$\text{H}_2$	50	2.5	1.0	1.85	-	-	400

Далі на ПНХТ Л2-56 досліджувалась ВАХ виготовлених фотодіодів та якісні характеристики їх фоточутливості до впливу електро-магнітного випромінювання, утвореного макетним джерелом:

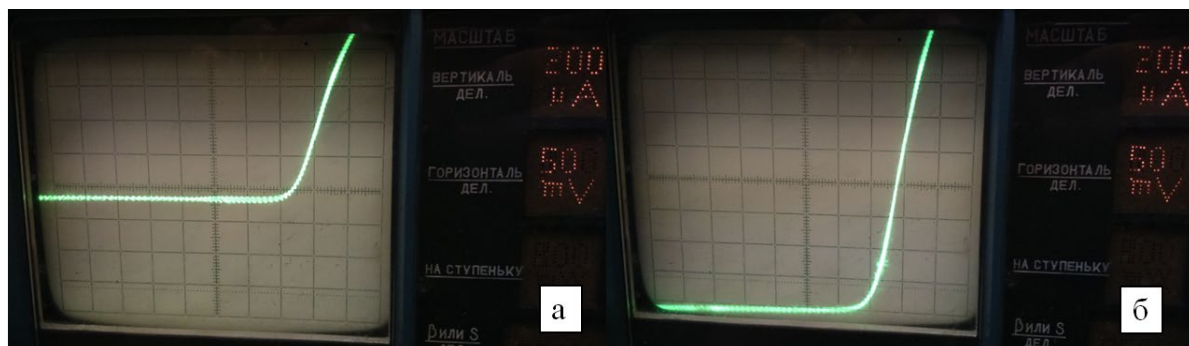


Рисунок 3.22 – ВАХ фотодіода при  $T=77\text{K}$  без опромінення (а) та в умовах опромінення макетним джерелом (б)

Для оцінки отриманих результатів по фоточутливості діодів, в тих же умовах була виміряна напівтаблетка фотодіоду «САРНА» з вмонтованими інтерференційним фільтром та кварцевою діафрагмою:

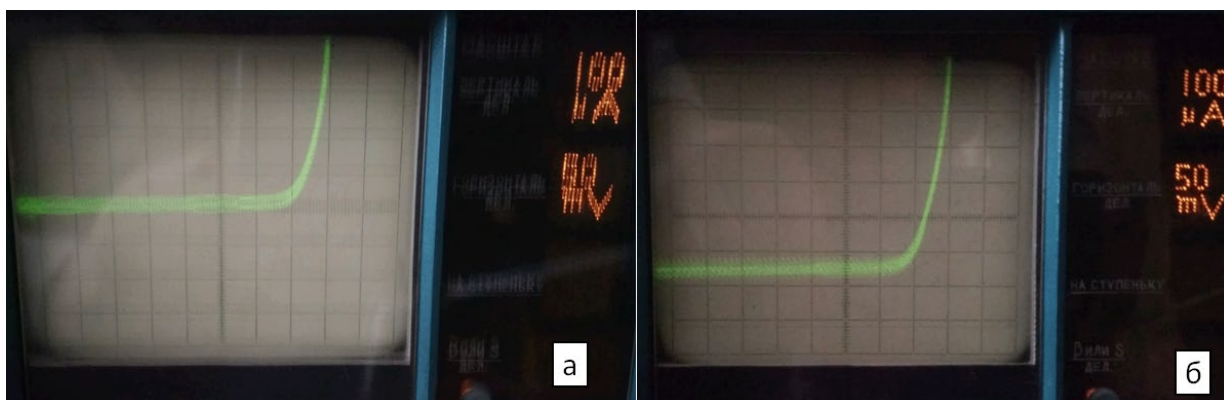


Рисунок 3.23 – ВАХ напівтаблетки фотодіоду «САРНА» при  $T=77\text{K}$  без опромінення (а) та в умовах опромінення макетним джерелом (б)

### 3.4. АНОДНЕ ОКИСЛЕННЯ АНТИМОНІДУ ІНДІЮ ФУНКЦІОНАЛЬНЕ ПРИЗНАЧЕННЯ ПАСИВАЦІЙНОГО ШАРУ

Важливим елементом структури фотовольтаїчних детекторів ІЧ-випромінювання на основі вузькощілинного напівпровідникового матеріалу InSb є пасивуючий поверхневий шар. Його функція полягає у формуванні переходу від вузькощілинного напівпровідника до широкозонного або діелектричного матеріалу із збереженням, наскільки це можливо, кристалічної структури на міжфазовій границі. Необхідність створення такого пасивуючого шару викликана в першу чергу потребою усунення впливу поверхневої провідності, яка, у разі відсутності пасивуючого покриття, шунтуватиме  $p$ - $n$  – перехід, зменшуючи зворотний опір фотодіода (рис.3.24). Додаткові струми, пов'язані з поверхневою провідністю, призводять до істотного погіршення чутливості та шумових характеристик, тому заходи, спрямовані на їх зменшення, є важливим елементом технології виготовлення фотодетекторів

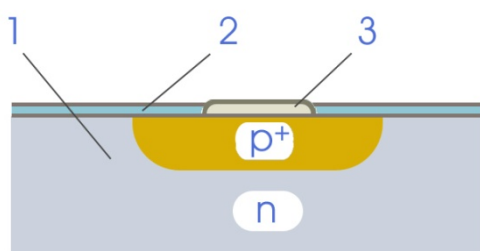


Рисунок 3.24 – Спрощена структура фотодіода: 1 – пластина  $n$ -InSb з областю  $p^+$ -типу, сформованою шляхом іонної імплантації Be; 2 - пасивуючий шар; 3 – металевий контакт до області  $p^+$ -типу. Пасивуючий шар перекриває виходи  $p$ - $n$  – переходу на поверхню з метою усунення шунтування переходу поверхневою провідністю

Відповідно до свого функціонального призначення, пасивуючий шар повинен задовольняти низці певних вимог. Однією з найважливіших з них є вимога структурної досконалості міжфазової границі з кристалом напівпровідникового матеріалу. Саме невизначеність структури та елементного складу «реальної», тобто незахищеної, поверхні напівпровідникового матеріалу



створює фізичні умови виникнення поверхневої провідності, а також центрів захоплення носіїв заряду, що викликає нестабільність поверхневого потенціалу. «Реальна» поверхня напівпровідника може розглядатися як двовимірний дефект кристалічної ґратки, у якому поверхневим атомам бракує партнерів для утворення ковалентних зв'язків. У рамках застарілої на даний час концепції «обірваних зв'язків» безпосередньо цим пояснювалося виникнення поверхневих енергетичних станів носіїв заряду. Сучасні уявлення про будову поверхні були значно удосконалені, але якісно висновки про природу поверхневих станів залишилися аналогічними. З точки зору хімічної будови ненасичені валентні зв'язки можуть розглядатися як вільні радикали, які, як відомо, мають надзвичайно високу реакційну активність і можуть існувати лише дуже короткий час. Як свідчать структурні дослідження атомарно- чистої поверхні методом дифракції повільних електронів та моделювання за допомогою теорії функціоналу щільності, на поверхні завжди відбувається структурна реконструкція, яка призводить до насичення т.з. «обірваних зв'язків». Але при цьому створюються механічні напруження, що зменшують енергію електронів, які беруть участь у цьому процесі у порівнянні з об'ємним матеріалом. Таким чином, на атомарно-чистій поверхні виникають енергетичні рівні, які потрапляють у заборонену зону напівпровідника, а у разі перекриття їх електронних орбіталей – і зона провідності.

На відміну від атомарно-чистої поверхні, на «реальній» поверхні завжди відбуваються неконтрольовані хімічні реакції зі сполуками, які присутні в оточуючому середовищі, і це також призводить до виникнення поверхневих станів і поверхневої провідності. Більше того, внаслідок високої реакційної активності свіжоутвореної поверхні вона може зв'язувати елементи, присутні навіть у незначній кількості, що стає джерелом забруднень на подальших стадіях технологічного процесу. Тому пасивація може бути необхідною не лише на фінальному, але і на проміжних етапах виготовлення напівпровідникового приладу. Так, технологічний процес виготовлення сучасної мікросхеми на основі Si включає приблизно 500 – 600 операцій, з яких близько 30% становлять операції

очищення поверхні. Для пасивації поверхні кремнієвих пластин на проміжних технологічних стадіях довгий час, а значною мірою й досі, використовується так званий «RCA clean» процес, винайдений у 60-х роках минулого століття співробітником Radio Corp. of America Вернером Керном.

Фінальні стадії виготовлення приладів на основі Si включають формування ізолюючого шару на поверхні, який визначає її електрофізичні параметри і найчастіше застосовується як підзатворний діелектрик. Тривалий час діелектричний шар формувався шляхом термічного окислення. Основною структурною одиницею діоксиду кремнію є кремній-кисневий тетраедр, у якому дві гібридні орбіталі кисню з неспарованими електронами утворюють два  $\sigma$ -зв'язки з однією з  $sp^3$  орбіталей атому кремнію (кут зв'язку Si-O-Si дорівнює  $109^\circ 28'$ ). Але особливість електронної конфігурації цих орбіталей така, що існує можливість участі в утворенні ковалентних зв'язків також гібридних орбіталей  $sp^2$  та  $sp$ , при яких виникають  $\pi$ -зв'язки з іншою просторовою будовою. Тому кремній-кисневий тетраедр виявляється здатним до деформації, чим пояснюється схильність двоокису кремнію до утворення склоподібного стану. Стосовно пасивуючої плівки, це сприяє легкості узгодження алмазоподібної кристалічної структури Si з матрицею оксиду, необхідного для формуванням структурово досконалої фазової границі. Однак в останнє десятиліття у зв'язку з переходом на нанорозмірні проектні норми постало питання про заміну  $SiO_2$  на так звані «high k» діелектрики, головним чином на основі оксиду гафнію[2].

### **3.4.1. МЕТОДИ ПАСИВАЦІЇ АНТИМОНІДУ ІНДІЮ**

З фізико-хімічних міркувань, утворення плівки оксиду є найбільш очевидною стратегією пасивації поверхні напівпровідникових матеріалів. Зазвичай оксиди є діелектриками, а енергія ковалентних зв'язків з киснем загалом значно перевищує енергію зв'язків між елементами, з яких складається більшість напівпровідникових сполук, зокрема, InSb. Тому енергетичні рівні валентних електронів оксиду мусять лежати вище забороненої зони напівпровідника і не повинні призводити до виникнення поверхневої провідності.

Але формування оксидних плівок на поверхні напівпровідникових сполук  $A^3B^5$  (так само як і  $A^2B^6$ ) викликає певні технологічні проблеми. На відміну від кремнію, InSb має досить низьку температурну стійкість ( $T_{пл.} = 525,2^\circ\text{C}$ ), тому застосування процесу термічного окислення для нього неможливе. Пасивація InSb здійснюється із застосуванням «холодних» процесів для запобігання утворення дефектів внаслідок термічної нестійкості цього матеріалу. Історично першим методом формування пасивуючої плівки на поверхні InSb був електрохімічний процес анодного окислення [3], який довгий час використовувався у технології виготовлення ІЧ-детекторів на основі цього матеріалу. Хоча з точки зору електрофізичних параметрів анодна плівка, яка складається з власних оксидів, має задовільні пасивуючі властивості для фотодетекторів на основі InSb, її недостатня хімічна стійкість викликала технологічні труднощі при виготовленні більш складних фотоприймальних пристроїв, таких, як матричні формувачі зображення для тепловізійних систем. Тому було докладено багато зусиль для пошуку альтернативних методів пасивації приладів на основі цього матеріалу. Зокрема, досліджувалися технологічні процеси, які до цього були розроблені для застосування при виготовленні приладів на основі кремнію. Серед них слід відзначити фотохімічні, плазмохімічні та парофазні методи нанесення  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiO}_x$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  та їх комбінацій [4]. При цьому були досягнуті достатньо високі електрофізичні параметри пасивуючих покриттів. Так, методом низькотемпературного парофазного хімічного осадження (LTCVD)  $\text{SiO}_2$  шляхом піролітичного розкладання силану у присутності кисню була досягнута щільність поверхневих станів  $\geq 10^{10} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ , а вольт-фарадна (C-V) крива не мала гістерезису [5]. Особливість цього методу полягала у збереженні тонкого шару власного оксиду під плівкою  $\text{SiO}_2$  за рахунок підібраних відповідним чином режимів процесу.

Розвиток технологій епітаксійного росту створив передумови для створення принципово відмінного і потенційно найбільш досконалого методу пасивації приладів на основі напівпровідникових сполук  $A^3B^5$  та  $A^2B^6$ . Він полягає у формуванні на поверхні шару аналогічної за хімічним складом по відношенню до

основного матеріалу сполуки із збільшеною шириною забороненої зони. При цьому досягається найбільш повне узгодження кристалографічних ґраток на міжфазовій поверхні, висока кристалографічна досконалість пасивуючого шару та висока чистота матеріалу. Фактично, таке пасивуюче покриття являє собою гетероструктуру, верхній шар якої складається з більш широкозонного напівпровідника у порівнянні з нижнім шаром. Такий метод пасивації набув широкого розповсюдження при створенні фотодетекторів на основі  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ , де пасивація досягається шляхом епітаксійного нарощування шару  $\text{CdTe}$  [6]. Для пасивації приладів на основі  $\text{InSb}$  були запропоновані епітаксійні шари потрібної сполуки  $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{Sb}$  [7]. Були опубліковані дані про створення світловипромінюючих діодів на основі гетероструктур  $\text{InSb} / \text{AlInSb}$  [8]. Також відомо, що у цих гетероструктурах спостерігається квантовий ефект Холла [9]. Але даних про практичне використання  $\text{AlInSb}$  як пасивуючого покриття для матеріалу  $\text{InSb}$  у відкритих літературних джерелах нами знайдено не було.

### **3.4.2. ПАСИВАЦІЯ АНТИМОНІДУ ІНДІЯ МЕТОДОМ АНОДНОГО ОКИСЛЕННЯ**

Одним з методів формування пасивуючого покриття на поверхні монокристалічних пластин  $\text{InSb}$ , які застосовувалися у дняній роботі, був метод анодного окислення. Крім своєї основної функції – зменшення поверхневих струмів у місцях виходу р-n-переходу на поверхню - анодні оксидні плівки, поряд з покриттями інших типів, були також випробувані у ролі проміжних захисних покриттів на певних етапах технологічного процесу, і був проведений порівняльний аналіз отриманих результатів.

Технічна реалізація методу анодного окислення досить проста. Цей процес здійснюється у триелектродній електрохімічній комірці, а параметри процесу задаються за допомогою потенціостату (Рис.3.2).

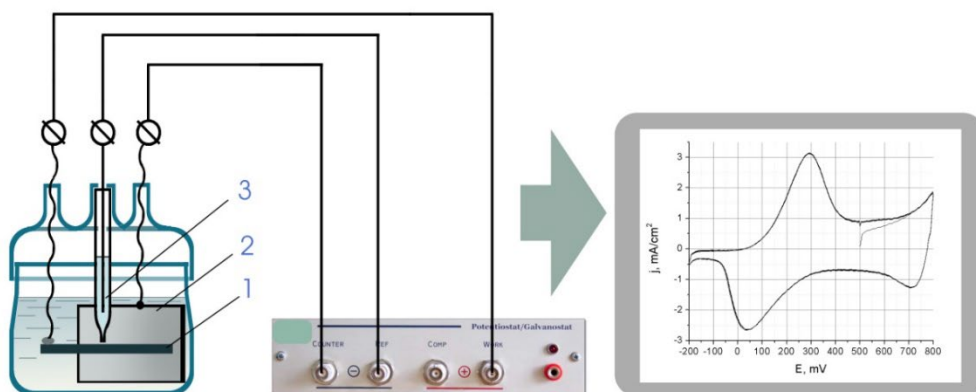


Рисунок 3.25 – Схема підключення триелектродної електрохімічної комірки до потенціостату. 1 – зразок матеріалу («робочий» електрод), 2 – допоміжний електрод, 3 – електрод порівняння. Електрод порівняння під'єднується до електрометричного входу потенціостату і призначений для вимірювання потенціалу електроліту по відношенню до робочого електроду. Допоміжний електрод призначений для керування потенціалом електроліту

В роботі використовувалася триелектродна комірка власної конструкції, пристосована для анодної обробки пластин InSb поздовжніми розмірами до ~5 см. Для контролю потенціалу електроліту використовувався насичений хлор-срібний електрод порівняння ЭВЛ-1МЗ (потенціал по відношенню до стандартного водневого електроду 201,3 мВ при 20°C). Керування процесом окислення здійснювалося за допомогою потенціостату П-5848. Застосовувався двоступеневий процес, на першій стадії якого задавався гальваностатичний режим (при постійному струмі робочого електроду), а на другій – потенціостатичний (при постійному потенціалі), який підтримувався до спадання анодного струму нижче заданої величини.

Важливе значення для хімічної будови, структури та електрофізичних параметрів анодної оксидної плівки (АОП) має склад електроліту. Для отримання т.з. бар'єрних оксидів, які характеризуються високою щільністю та відсутністю мікропор, застосовуються електроліти, у яких відсутнє розчинення продуктів анодного окислення. Саме такий тип АОП використовується для пасивації

поверхні напівпровідникових приладів. В той же час для отримання нанопоруватих оксидних плівок застосовуються електроліти, у яких відбувається часткове розчинення оксидної плівки. Процеси формування нанопоруватих плівок використовуються як у технічних цілях, наприклад, для формування міцних захисних покриттів на поверхні алюмінієвих конструкцій[10], так і для створення матричних структур із впорядкованими порами для застосування у нанотехнології [11].

Можливість формування щільних АОП бар'єрного типу полягає у особливостях механізму росту анодного оксиду. Цей механізм детально вивчався експериментально різними методами, зокрема, шляхом дослідження міграції стабільних та радіоактивних ізотопів під час росту оксиду [12] та шляхом аналізу профіля елементного складу оксидів, одержаних шляхом окислення двошарових металевих поверхонь [13]. Як показали ці дослідження, у міграційному процесі беруть участь усі атоми в оксиді таким чином, що зростання оксиду навіть на один атом вимагає пересування всього ланцюжка атомів вздовж товщини оксидної плівки; при цьому послідовність мічених ізотопами шарів зберігається. Такі спостереження дозволили зробити висновок, що основним механізмом переносу при анодному окисленні є міграція заряджених вакансій у сильному електричному полі (Рис.3.3). Під час росту анодного оксиду на InSb у процесі переносу беруть участь як аніонні, так і катіонні вакансії. Кінетика росту АОП за механізмом твердофазного електрохімічного транспорту. описується теорією Вагнера та її модифікаціями [14].

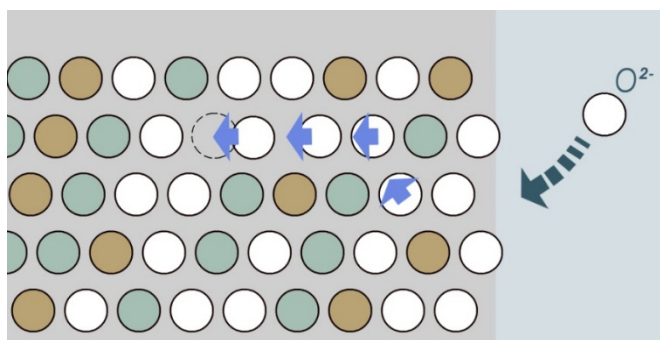


Рисунок 3.26 – Схема польової міграції кисневої вакансії у процесі росту анодної плівки. Позитивно заряджена вакансія утворюється на міжфазовій

границі оксид-напівпровідник внаслідок утворення неповновалентної структурної одиниці оксиду і просувається до зовнішньої границі шляхом послідовного заміщення атомами кисню. На зовнішній поверхні вона заповнюється іоном кисню з утворенням повновалентного оксиду.

В роботі використовувався електроліт такого складу:

- 45-55 об'ємних % 0,05 моль/л розчину персульфата аммонію  $((\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8)$  у гліцерині,
- 45-55 об'ємних % диметилформаміду.

Окислення здійснювалося у гальваностатичному режимі у дві стадії. На першій стадії (80 – 90 хвилин) щільність струму підтримувалася на рівні 70 мкА/см<sup>2</sup>, а на другій (30 хвилин) – 40 мкА/см<sup>2</sup>.

Ріст АОП у вказаному режимі продовжувався до досягнення різниці потенціалів на границі електроліт – напівпровідних  $\approx 20$  В. На неполярних кристалографічних поверхнях  $\langle 110 \rangle$  оксид мав блакитний колір, а його товщина, за даними еліпсометричних вимірювань, становила  $\approx 50$  нм. На протилежних полярних гранях  $\langle 111 \rangle$  колір і товщина оксиду відрізнялися між собою і становили  $\approx 50$  нм («блакитний» бік) та  $\approx 40$  нм (бузковий з брунатним відтінком). Таку різницю можна пояснити різними потенціалами окислення протилежних полярних граней.

### 3.5 ВИБІР ТРАВНИКА INSB ДЛЯ ФОРМУВАННЯ МЕЗАСТРУКТУРИ ФОТОЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТУ.

Особливості конструкції та способу реалізації кристала фоточутливого елемента, як то:

- невелика глибина залягання р-п переходу (0,3-0,5 мкм.);
- необхідність проведення фотолітографічних процесів по рельєфу кристалу після формування меза області;
- металева комутація активних елементів конструкції по рельєфу кристалу,

накладають ряд вимог до вибору травника:

- невисока швидкість травлення (0,1- 4,0 мкм./хв.) для високої відтворюваності процесу по глибині травлення ( $0,7 \pm 0,1$  мкм.);
- травник повинен бути поліруючим;
- невисока селективність травлення відносно типу провідності антимоніду індію;
- висока ізотропність (для формування пологого рельєфу по висоті травлюємого матеріалу);
- достатня селективність що до травлення фоторезистивної маски.

За аналізом науково-технічної літератури для експериментального опробування були обрані травники:

1.  $\text{HNO}_3:\text{HF}=1:1$ ;
2.  $\text{HNO}_3:\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$  (40%)=1:3, де  $[\text{HOOC}-\text{CH}(\text{OH})-\text{CH}(\text{OH})-\text{COOH}]$  або  $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$  - винна кислота];
3.  $\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}:\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$  (40%)= 5:3:3:4,6;
4.  $\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}:\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$  (40%)= 5:3:3:11;
5.  $\text{HF}48\% : (\text{COOH})_210\% : \text{H}_2\text{SO}_4 96\%: \text{H}_2\text{O}_230\% = 4:1,5:4:0,3$ , де  $[\text{HOOC}-\text{COOH}]$  або  $(\text{COOH})_2$  - щавлева кислота];
6.  $\text{HNO}_3 65\% : \text{CH}_3\text{COOH} 48\% : \text{HF} 48\% : \text{H}_2\text{O} = 2 : 1 : 1 : 10$ [CP4A];
7.  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_730\% : \text{H}_2\text{O}_230\%= 25:1$ , де  $[\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7]$ - лимонна кислота]

Порядок проведення експерименту.



Вихідні платівки: InSb, n- типу провідності леговані Te,  $n_e = (0,8 \div 2,0) \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  (111) при 77°C

попередньо оброблені хіміко-механічним поліруванням обезжирювали 3-и кратнім кип'ятінням в ізопропиловому спирті та висушувались в потоці гарячого осушеного азоту (N<sub>2</sub>).

На платівки локально наносився хімічно стійкий лак, який механічно видалявся з платівок після процесу травлення.

Для платівок, які оброблялися в травниках №№ 4 та 7 попередньо стравлювали власний окис в травнику HF48% : H<sub>2</sub>O = 1:50 120 сек, далі платівки відмивали в деіонізованій воді протягом 5 хв. та висушували на фільтрувальному обеззоленому папері.

В травники №№ 5 та 7 перекис азоту вводили безпосередньо перед травленням.

Травлення проводили при кімнатній температурі -  $22 \pm 2^\circ\text{C}$ .

Платівки вводились в травник, що постійно перемішувався за допомогою пінцету з фторопластовими наконечниками.

Після травлення платівки відмивали в деіонізованій воді протягом 5 хв. та висушували на фільтрувальному обеззоленому папері.

Глибину травлення вимірювали методом інтерферометрії на мікроскопі МІІІ-4.

Клин травлення вираховували, попередньо вимірявши ширину зоні травлення вздовж маски хімістійкого лаку (в полі мікроскопа при збільшенні  $\times 200$ ) та глибини травлення.

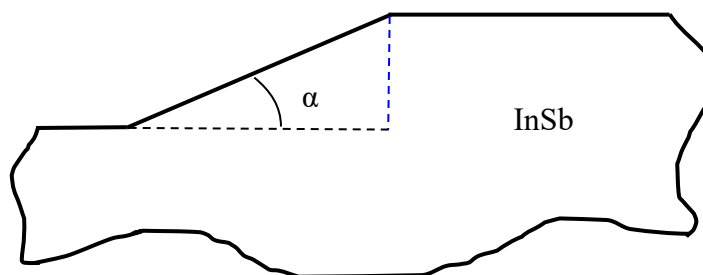


Рисунок 3.27 - Схематичне зображення розтину фрагмента кристалу після травлення мези

Результати експерименту зведені до таблиці 3.2:

Таблиця 3.2 – Результати експерименту

№ п.п.	Хімічний склад травника	Час травлення, (сек.)	Швидкість травлення, (мкм./хв.)	Якість протравленої поверхні	Клин травлення	Примітки
1	$\text{HNO}_3:\text{HF}=1:1$	5	60	дзеркальна	$18^\circ$	
2	$\text{HNO}_3:\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6 (40\%)=1:3$	120	1	Матова зі зміною кольору до темного		
3	$\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}:\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6 (40\%)=5:3:3:4,6$	60	3,3	дзеркальна з виявленням структурних дефектів кристалічної ґратки	$31^\circ$	Рис. 3.25
4	$\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}:\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6 (40\%)=5:3:3:11$	120	0,8	дзеркальна	$49^\circ$	Рис. 3.26
5	$\text{HF}48\% : (\text{COOH})_210\% : \text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_230\% = 4:1,5:4:0,3$	60	3,6	дзеркальна	$45^\circ$	Рис. 3.27
6	$\text{HNO}_3 65\% : \text{CH}_3\text{COOH} : 48\%\text{HF} 48\% : \text{H}_2\text{O} = 2 : 1 : 1 : 10$	60	6,0	дзеркальна		
7	$\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 30\% : \text{H}_2\text{O}_2 30\% = 25:1$	3000	0,0333	Дзеркальна з виявленням структурних дефектів кристалічної ґратки	$10^\circ$	Рис. 3.28, Рис. 3.29, Рис. 3.30

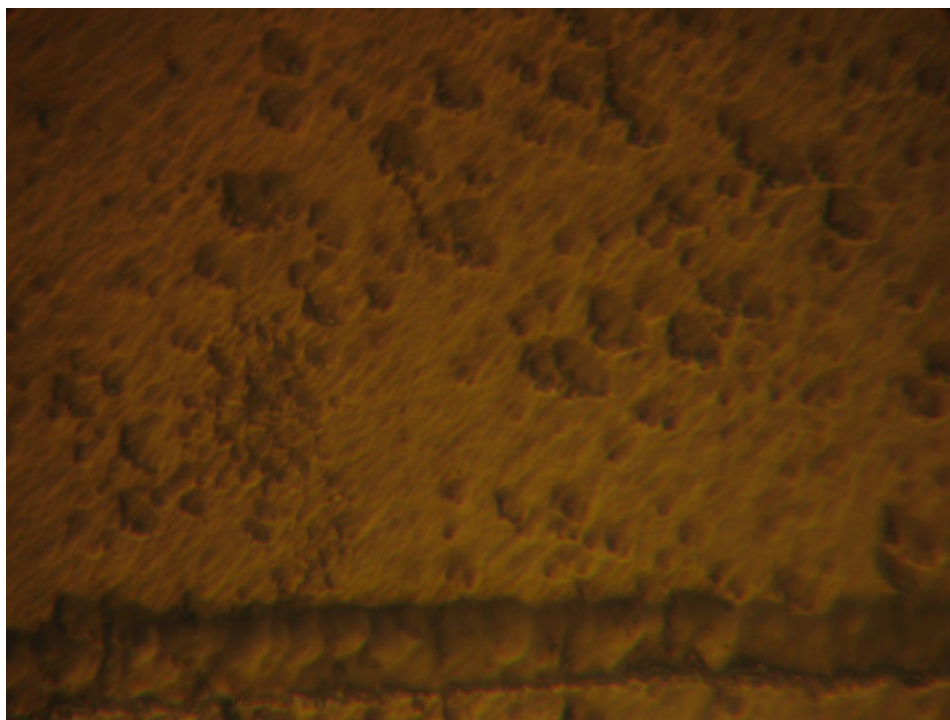


Рисунок 3.28 - Результат травлення по п.3 в полі мікроскопу при збільшенні  $\times 1000$

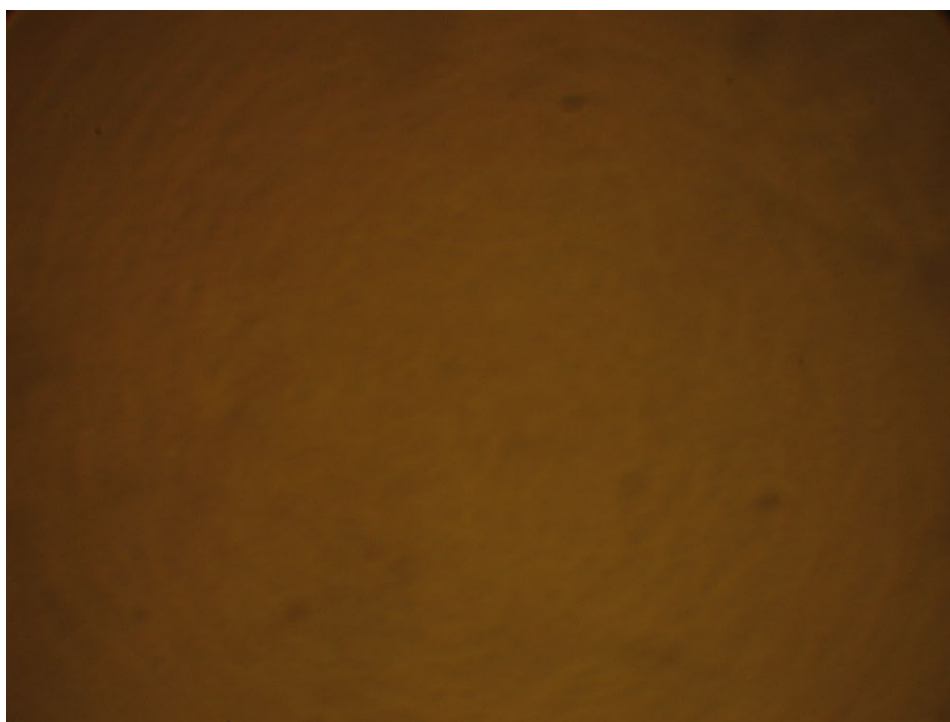


Рисунок 3.29 - Результат травлення по п.4 в полі мікроскопу при збільшенні  $\times 1000$

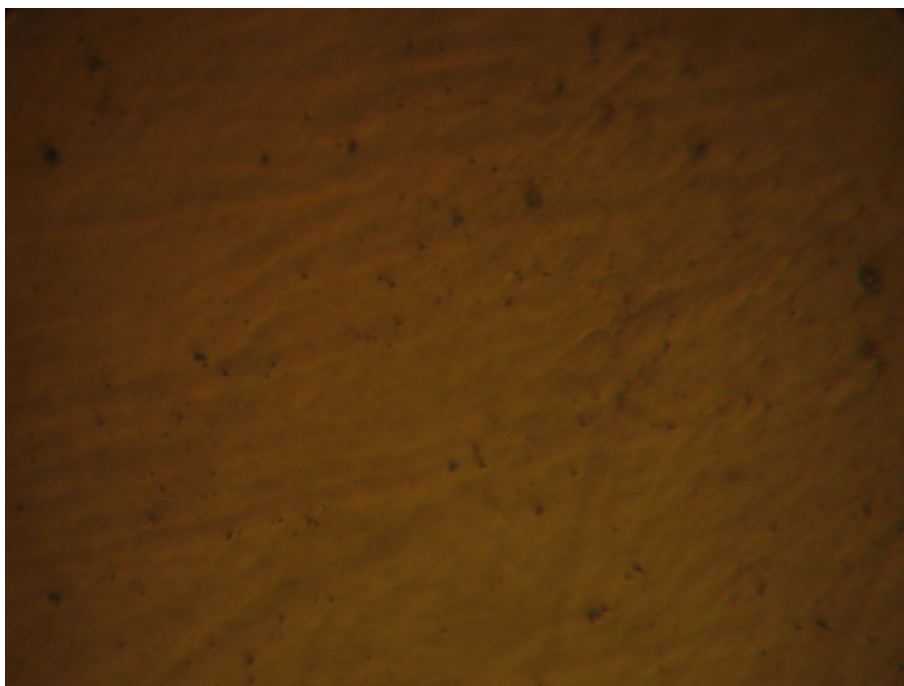


Рисунок 3.30 - Результат травлення по п.5 в полі мікроскопу при збільшенні  $\times 1000$

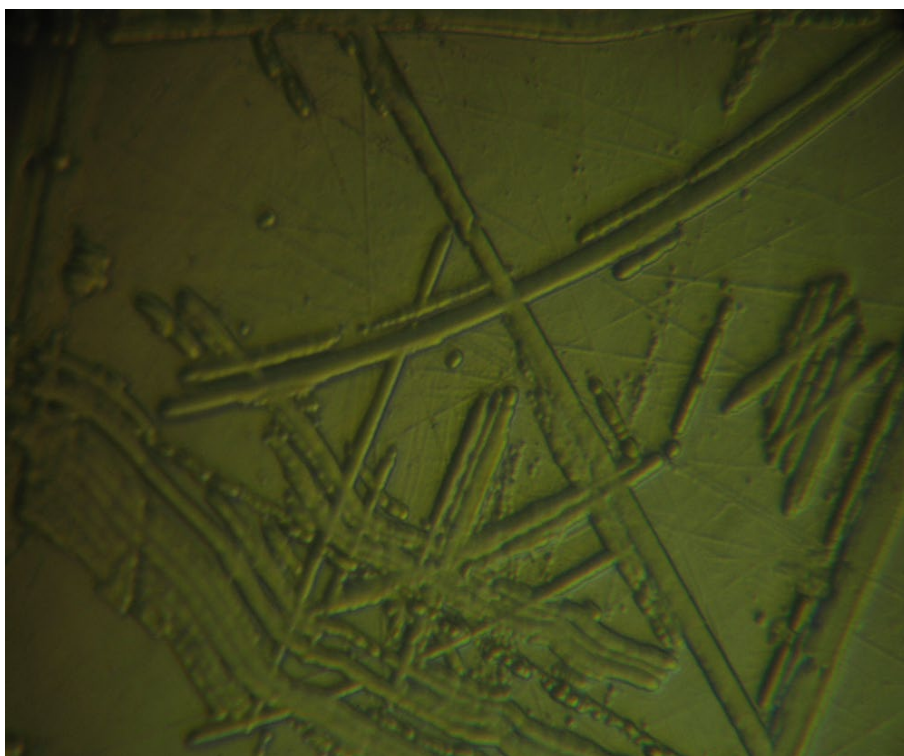


Рисунок 3.31 - Результат травлення по п.7 в полі мікроскопу при збільшенні  $\times 1000$

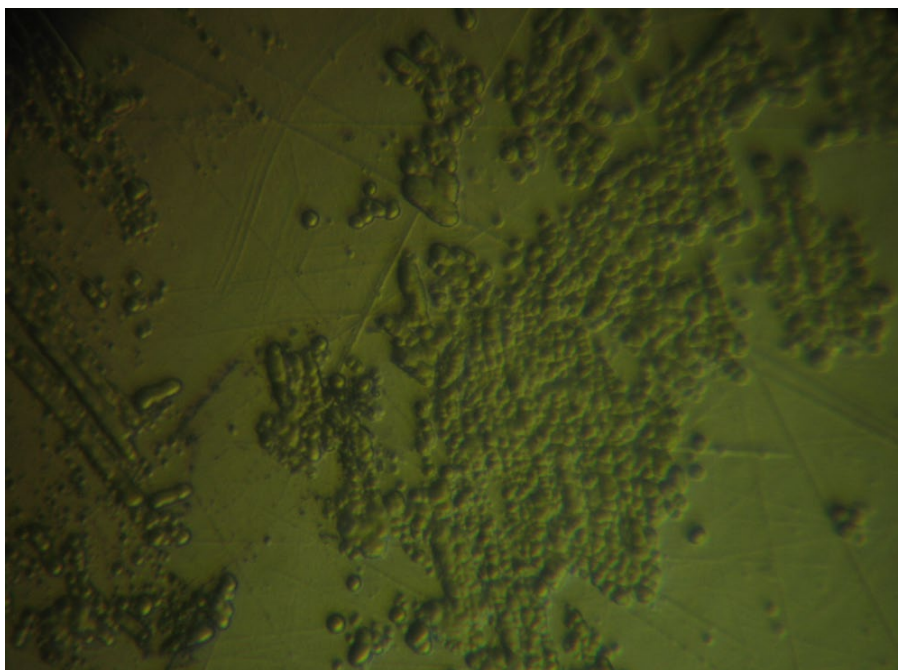


Рисунок 3.32 - Результат травлення по п.7 в полі мікроскопу при збільшенні  $\times 1000$

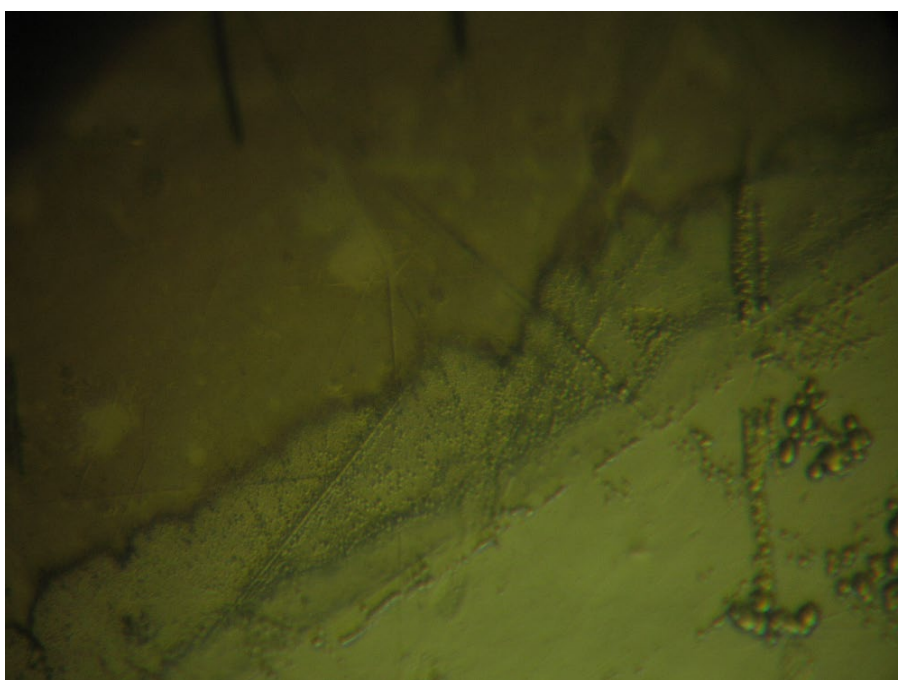


Рисунок 3.33 - Вид клину травлення по п.7 в полі мікроскопу при збільшенні  $\times 1000$

## Висновки:

В даному розділі було удосконалено базову технологію виготовлення фоточутливого елементу. За результатами ВАХ першої партії ФЧЕ було видно що зразки діодів мають як фотодіодний характер, так і фоторезистивний. Основними причинами є:

- низький динамічний опір зворотньоозміщеного р-n-переходу, який викликаний значною дефектністю структури в області формування ОПЗ;
- провідна плівка окису індію, яка формується при нанесенні пасивуючого окису кремнію в PECVD процесі з окислюючої парогазової суміші  $\text{SiH}_4 + \text{N}_2\text{O}$ .

Для того, щоб зменшити дефектність структури в області формування ОПЗ було вирішено перейти від одностадійної до двостадійної імплантації. Щоб вирішити проблему з плівкою окису індію було вирішено застосовувати метод формування окисних покриттів, який не спричиняє окиснення підкладки: атомно шарове напорошення за умов надвисокого вакууму (ALD). Але в Україні відсутнє обладнання для ALD, тому вирішено проводити пасивацію безпосереднього виходу рn-переходу на поверхню платівки InSb (з урахуванням зони просторового заряду) плівкою нітриду кремнію, отриманою методом PECVD з безкисневої парогазової суміші  $\text{SiH}_4 + \text{NH}_3$ .

## 4. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

### 4.1. ОПИС ІДЕЇ ПРОЕКТУ

Таблиця 4.1 - Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Використання тепловізійної техніки для спеціальних приладів для вирішення об'єктів з підвищеною температурою на фоні оточуючого середовища в умовах значної віддаленості об'єкта незалежно від рівня природної освітленості	1. Військово-промисловий комплекс	Вирішення працюючої техніки на фоні навколишнього середовища
	2. Електроніка	Вимірювання спектрів відбиття або поглинання випромінювання

Таблиця 4.2 - Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п / п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент 1	Конкурент 2			
1.	Економічні	450 у.о.	300 у.о.	400 у.о.	+		
2.	Призначення	Детектор ближнього ІЧ-діапазону	Детектор середнього ІЧ-діапазону	Детектор середнього ІЧ-діапазону		+	
3.	Надійність	Довговічність (>10 років)	Довговічність (>10 років)	Довговічність (>10 років)		+	
4.	Технологічні	Типова конструкція фотодіоду. Діаметр активної області: 1,3мм. Необхідність охолодження до 77К	Типова конструкція фотодіоду. Розмір активної області: 1x1мм. Необхідність охолодження до 213К	Типова конструкція фотодіоду. Діаметр активної області: 1мм	+		



#### Продовження таблиці 4.2

5.	Ергономічні	-	-	-		+	
6.	Органолептичні	-	-	-		+	
7.	Естетичні	-	-	-		+	
8.	Транспортальності	Поставляється у вигляді фоточутливого елемента або у металевому корпусі типу 66С	Поставляється у металевому корпусі типу Р6606-330	Поставляється у металевому корпусі типу 3СN		+	
9.	Екологічність	Екологічно	Екологічно	Неекологічно (наявність в складі ртуті)		+	
10	Безпека	Умовно безпечно	Умовно безпечно	Умовно безпечно		+	

Конкурент 1: Виробник ІЧ фотодіодів «Hamamatsu».

Конкурент 2: Виробник ІЧ фотодіодів «Teledyne Judson Technologies».

## 4.2. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АУДИТ ІДЕЇ ПРОЕКТУ

Таблиця 4.3 - Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Оптимізація технологічного маршруту виготовлення фотодіодів на основі InSb	Іонна імплантація	Наявна	Доступно
		Високотемпературна дифузія	Наявна, але утворені структури мають пригнічені властивості	Доступно
		PECVD	Наявна	Доступно
		ALD	Наявна	Недоступно, через відсутність в Україні приладів для ALD



### 4.3. АНАЛІЗ РИНКОВИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ЗАПУСКУ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Таблиця 4.4 - Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	2
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	25000 ум.од.
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Розгортання великого виробництва
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Має необхідність в сертифікації RoHS (Restriction of Hazardous Substances), а також сертифікації електронних компонентів
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	200%

Ринок є привабливим для входження.

Таблиця 4.5 - Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів
	Незалежність у справах військово-промислового комплексу від інших країн	Компанії виробники тепловізійної техніки	-	Товар повинен мати високу чутливість, довговічність та швидкість роботи

Таблиця 4.6 - Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Наявність кваліфікованих кадрів	Забезпечення якості виробництва вимагає спеціалізованих навичок від персоналу	Пошук персоналу у науково-дослідних інститутах та організаціях
2.	Потреба в ресурсах	Виробництво потребує додаткових умов для створення готового продукту та перевірки його відповідності до заявлених вимог	Укладання договорів з поставниками ресурсів та оренда приміщень для виготовлення та тестування продукту
3	Необхідність в сертифікуванні	Матеріали з високою ймовірністю згорання мають проходити спеціальне сертифікування	Наймання спеціалістів з проходження сертифікації та вкладення додаткової уваги в забезпечення нормативності продукції

Таблиця 4.7 - Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Робота над товаром для покращення його характеристик та здешевлення вартості	Покращення характеристик товару
2.	Попит	Створення власної мережі продажу товарів та співпраця з виробниками	Збільшення виробництва товару. Організація додаткового зворотнього зв'язку з покупцями
3.	Новітність	Галузь обмежено представлена на ринку, з ростом якості буде збільшуватись кількість умовних охочих на фінансування	Додаткова реклама та впровадження роботи з фондами для залучення додаткових коштів у компанію

Таблиця 4.8 - Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції: - поліполія	На ринку присутня значна кількість компаній;	Підвищення якості товару шляхом розробки нових технологій. Маркетингове просування товару. Об'єднання з існуючими консернами
2. За рівнем конкурентної боротьби - міжнародний	Місцезнаходження фірм не обмежується територіально;	Розробка веб-сайту компанії з наявністю іноземних мов та залучення додаткового колцентру для створення якісного обслуговування
3. За галузевою ознакою - внутрішньогалузева	Економічна боротьба між виробниками однієї галузі економіки, що реалізують схожі за характеристиками товари, задовольняючи одній й ті самі потреби. Наявні відмінності у виробничих затратах, якості, ціні, тощо.	Моніторинг ринку конкурентів. Розширення роботи з фондами для забезпечення додаткових інвестицій з різних галузей для розширення можливостей застосування
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Конкуренція між товарами одного виду	Покращення якостей виготовляемого товару
5. За характером конкурентних переваг - нецінова	Передбачає продаж продукції підвищеної якості нехтуючи ціною	Продаж якісного товару не нижче середньо ринкової пропозиції
6. За інтенсивністю - немарочна	Роль торгової марки незначна	Необхідно створити сильну взаємодію з великими гравцями

Таблиця 4.9 - Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	«Hamamatsu» «Teledyne Judson Technologies»	Відсутні	Товар продається постачальниками та розробниками	Вимоги до якості та довговічності товару	Замінники в якості інших джерел енергії
Висновки	Інтенсивність досить висока, конкуренти вже давно на ринку	Відсутні	Постачальники встановлюють додаткові умови роботи на ринку	Товар має задовольняти зазначені потреби	Обмеження в ціні та екологічності

Для створення конкурентоспроможності на ринку, до розробки товару необхідно залучити кваліфікованих науковців та інженерів для покращення характеристик поточного продукту та розробки нових. Важливим є залучення маркетологів для створення реклами продукту та просування його на ринок з метою заміщення долі конкурентів.

Таблиця 4.10 - Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Ступінь чутливості.	Один з конкурентів надає покращення одної з зазначених характеристик свого продукту, проте не звертає уваги на іншу
2.	Якість розробки з точки зору показників довговічності циклів застосування	Продукт повинен мати високий рівень продуктивності в порівнянні з конкурентами та зберігати його впродовж великої кількості циклів
3.	Наявність наукових ресурсів	Для покращення якості продукції та шляху виробництва потрібні наукові ресурси
4.	Економічний (ціна товару)	Ціна товару має бути раціональною та конкурентоздатною.

Таблиця 4.11 - Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з "3М"						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Ступінь покращення чутливості та інших важливих характеристик.	19		+					
2.	Якість розробки з точки зору показників довговічності циклів застосування	16				+			
3.	Наявність наукових ресурсів	14				+			
4.	Економічний (ціна товару)	12					+		

Таблиця 4.12 - SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: ступінь покращення чутливості та інших характеристик.	Слабкі сторони: Економічні (ціна товару)
Можливості: розвиток нового проекту призведе до більшої кількості досліджень в цьому напрямку	Загрози: Збільшення собівартості товару через збільшення вартості ресурсів для виробництва.

Таблиця 4.13 - Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Пошук компаній збуту, пошук інвесторів, пошук наукових ресурсів, налагодження виробництва, вихід на ринок	80 %	4 роки
2.	Пошук інвесторів, становлення власної компанії збуту, налагодження виробництва, пошук наукових ресурсів, вихід на ринок	70%	4 роки

Обрано альтернативу № 1.

#### 4.4. РОЗРОБЛЕННЯ РИНКОВОЇ СТРАТЕГІЇ ПРОЕКТУ

Таблиця 4.14 - Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Приватні підприємства	Часткова готовність	Середній	Середня	Висока
2.	Приватні особи	Часткова готовність	Низький	Низька	Низька
3.	Державні підприємства	Готові	Високий	Висока	Висока
Які цільові групи обрано: обрано цільову групу №3.					

Таблиця 4.15 - Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1.	Диференційований маркетинг	Інноваційність технології та широке поширення завдяки налагодженню контактів з основними гравцями дозволять забезпечити швидке поширення на ринку	Інноваційність технології	Стратегія диференціації

Обрано стратегію диференціації.

Таблиця 4.16 - Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1.	Ні	Так	Так, показники довговічності та концепції використання технік виробництва	Виклику лідера

Таблиця 4.17 - Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Підвищена, в порівнянні з конкурентами, продуктивність та довговічність	Диференціація	Інноваційність, покращення чутливості.	Оптимальне співвідношення ціна/якість, відсутність необхідності самостійного встановлення продукту, пряма співпраця з великими гравцями індустрії

#### 4.5. РОЗРОБЛЕННЯ МАРКЕТИНГОВОЇ ПРОГРАМИ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Таблиця 4.18 - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Покращення гравіметричних та об'ємних характеристик систем зберігання водню.	Збільшена ємність водню без кардинальної зміни технології виробництва	Конкуренти не використовують техніку багатокомпонентності для виготовлення продукту та не розгорнули масового виробництва

Таблиця 4.19 - Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
	300-400 у.о.	350-450 у.о.	>15000 у.о.	450-550 у.о.

Таблиця 4.20 - Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
	Замовлення товару на сайті (виробник) або через дилерські мережі (посередник)	Доставка продукту, інформування про характеристики, зберігання, сортування.	Канал нульового рівня	Збут продукції через посередників

Таблиця 4.21 - Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
	Застосування товару для зберігання енергії водню	Прямі - канал комунікації, коли інформація передається безпосередньо від інформатора до інформованої особи	Збільшення продуктивності зберігання енергії через оптимізовану технологію	Поширення інформації щодо появи іноваційного продукту з покращеними характеристиками. Акцентування уваги на позитивних сторонах товару: вища продуктивність, стабільність, широка комунікація з клієнтами	Звернення засноване на відмінностях між рекламованим товаром і тим, що пропонують конкуренти. Звернення ґрунтується на тому, чи іншому мотиваційному підході, покликаному впливати на споживчі переваги покупців, наприклад, функціональну перевагу, задоволення, імідж, захоплення.

## Висновки:

Можливість ринкової комерціалізації проекту не є досить високою через інноваційність технології та розвиненість технології прямих конкурентів. Оскільки ринок інфрачервоних детекторів наразі є зростаючим, то вихід товару з оптимальним співвідношенням ціна/якість дозволить захопити частину існуючого ринку, з можливістю охоплення нових покупців. Завадою може стати вибір користувачами більш дешевих та менш екологічних аналогів та здорожчання виробництва. В загальному, імплементація проекту є доцільною.



## ВИСНОВКИ

В ході даної роботи було розроблено фотодіод на основі InSb з використанням імплантації іонів берилію. На першому етапі розробки зразки діодів мали як фотодіодний характер, так і фоторезистивний. Це пояснювалося провідністю окисної плівки індію, яка формувалася на поверхні при нанесенні пасивуючого окису кремнію в PECVD процесі, а також формуванням ОПЗ в області максимальної концентрації дефектів. Оптимізація процесу, а саме: перехід від одностадійної імплантації до двостадійної вирішив проблему з формуванням ОПЗ в області максимальної концентрації дефектів. Проблема провідної окисної плівки не вдалося вирішити, тому що в Україні відсутнє обладнання для атомно шарового напорошення за умов надвисокого вакууму.

Параметри отриманих фотодіодів наступні: фотовідгук фотодіоду становить 800 мкА, в той час як для напівтаблетки фотодіоду «САРНА» він становить 150 мкА; усереднена чутливість 0,11 А/Вт.. Таким чином, інтегральна чутливість діодів в 5.3 рази вища за той же параметр на напівтаблетці фотодіоду «САРНА».

Отримані фотодіоди задовольняють вимогам інфрачервоних систем в військовій області.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Рогальский, А.В. - Инфракрасные детекторы / А.В. Рогальский. – Н. : Наука, 2003. - 636 с. – ISBN 5-02-032029-3.
2. Tetyorkin, V.V. Infrared photodiodes on II-VI and III-V narrow gap semiconductors / V.V. Tetyorkin, A.V. Sukach, A.A. Tkachuk // Photodiodes – from Fundamentals to Applications. - 2012. - P. 403–426.
3. Астахов, В.П. Результаты разработки фотодиодов на InSb с ультранизкими темновыми токами для высокочувствительных ПЗС / В.П. Астахов, П.Д. Гиндин, В.В. Карпов // Прикладная физика. - 1999. - №2. - С. 73–79.
4. Hurwitz, C.E. Planar InSb photodiodes fabricated by Be and Mg ion implantation. / C.E. Hurwitz, I.P. Donnelly // Solid-State Electronics. - 1975. - №9. - P. 753–756.
5. Курбатов, Л.Н. Оптоэлектроника видимого и инфракрасного диапазонов спектра: навч. посіб. / Л. Н. Курбатов. - М. : Видавництво «ФИЗМАТКНИГА», - 2001, - 320 с. – ISBN 5-89155-041-5
6. Горелик, Л.И. Тепловизионный прибор для спектрального диапазона 3–5 мкм на основе фотоприемного устройства из антимонида индия. / Л.И. Горелик, М.В. Кортиков, А.В. Полесский // Прикладная физика. - 2010. - №2. - С. 116–119.
7. Ueno, K. A novel InSb photodiodes infrared sensor operating at room temperature. / K. Ueno, G. Edson, Y. Kawakame, Y. Moriyasu, K. Nagase, N. Kuze: Wiley-VCH Verlag - 2006. – 891 P.
8. Morten, F. D. Photoconductive Indium Antimonide Detectors / F.D. Morten, R. E. J. King // Applied Optics. – 1965. - №4. – P. 659-663/
9. Маделунг, О. Физика полупроводниковых соединений элементов III и V групп / О. Маделунг - М.: Мир, 1967 – 478с.
10. Герасименко, Н.Н. Применение методов ионного легирования для создания р-n-переходов на InSb и InAs / Н.Н. Герасименко, А.А. Гузев, Г.Л. Курышев – М. : Препринт2, 1991. – 130с.

11. Курышев, Г.Л. Перераспределение бериллия в InSb и InAs при внедрении ионов и последующем отжиге. / Г.Л. Курышев, А.М. Мясников, В.И. Ободников // Физика и техника полупроводников. - 1994. - №3. - С. 439–442.
12. Liu, J. Rapid thermal annealing characteristics of Be implanted into InSb / J. Liu, Z. Tinging // Applied Surface Science. - 1998. – Vol. 126, №2. - P. 231–234.
13. Сукач, А.В. InSb фотодіоди / А.В. Сукач, В.В. Тетьоркін, І.М. Матіюк, А.І. Ткачук // Оптоелектроника и полупроводниковая техника — 2016. — Вип. 51. — С. 43-68.
14. Кольцов, Г.И. Профили распределения имплантированного бериллия в полупроводниковых соединениях АПВВ. // Г.И. Кольцов, В.В. Макаров, С.Ю. Юрчук // Физика и техника полупроводников. - 1996. - №10. - С. 1907–1916.
15. Даниленко С.Г. Розробка травильних композицій та технологічних процесів формування полірованих поверхонь підкладок арсеніду та антимоніду індію для приладів ІЧ-техніки: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.27.06. / Даніленко Світлана Григорівна; НАН України. Інститут фізики напівпровідників – К., 2000. - 15 с.
16. Reif. R. Handbook of Plasma Processing Technology / R. Reif. - Noyes, Park Ridge, New Jersey, USA : Rossnagel, Cuomo, and Westwood, Eds., 1990. – 268p.
17. Chen, F. F. Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion / F.F. Chen – New York, USA : Plenum Press, 1983 – 490p.
18. Vickerman, J. C. ToF-SIMS: Materials Analysis by Mass Spectrometry / J. C. Vickerman, D. Briggs – Chichester, West Sussex : IM Publications, 2013 – 732p. - ISBN 978-1-906715-17-5.
19. Sakurai, T. Formation and properties of anodic oxide films on indium antimonide / T. Sakurai, T. Suzuki, Y. Noguchi // Japanese Journal of Applied Physics. - 1968. – Vol. 7, №12. - P. 1491–1496.
20. Болтарь, К.О. Исследование фотодиодов с токами утечки в матричных фотоприемниках на основе антимонида индия // К.О. Болтарь, П.В. Власов, В.В. Ерощенко, А.А. Лопухин // Прикладная физика. - 2014. - №4. - С. 45–50.

21. Landan, J.D. Characterization of improved InSb interfaces / J.D. Landan, C.R. Viswanathan // Journal of Vacuum Science and Technology. - 1979. – Vol. 16, №5. - P. 1474–1477.
22. Wilmsen, C.W. Electrical conduction through thermal and anodic oxides of InSb / C.W. Wilmsen, G.C. Vasbinder, Y.K. Chang // Journal of Vacuum Science and Technology. - 1975. – Vol. 12, №1. - P. 56–59.
23. Wilmsen, C.W. Correlation between the composition profile and electrical conductivity of the thermal and anodic oxides / C.W. Wilmsen Journal of Vacuum Science and Technology. - 1976. Vol. 13, №1. - P. 64–67.
24. Santinacci, L. Characterization of thin anodic oxide on n-InSb(100) formed in aqueous solutions / L. Santinacci, G.I. Sproule, S. Moisa // Corrosion Science. - 2004. - Vol.46. - P. 2067–2079.
25. Chang, K.-M. Mesa etching characterization of InSb for high density image array application / K.-M. Chang, J.-J. Luo, C.-D. Chiang // Journal of the Chinese Institute of Engineers. - 2007. – Vol. 30, №1. - P. 11–16.
26. Hung, R.Y. Surface study of anodized indium antimonide / R.Y. Hung, E.T. Yon // Journal of Applied Physics. - 1970. – Vol. 41, №5. - P. 2185–2189.
27. Tang, X. Oxidation of the InSb surface at room temperature // X. Tang, R.G. van Welzenis, F.M. van Setten, A.J. Bosch // SciTechnol. - 1986. – Vol. 1, №6. - P. 355–365.
28. Adar, R. Slow trapping measurements in InSb-anodic oxide interface / R. Adar, I. Bloom, Y. Nemirovsky // Solid-State Electronics. - 1989. – Vol. 32, №2. - P. 111–118.
29. Huang, K.-F. Electrical properties of InSb metal-insulator-semiconductor diodes prepared by photochemical vapour deposition / K.-F. Huang, J.S. Shie, J.J. Luo, J.S. Chen // Thin Solid Films. - 1987. – Vol. 151. - P. 145–152.
30. Sah C.T. Carrier generation in p-n junctions and p-n junction characteristics / C.T. Sah, R.N. Noyce, W. Shockley // Proceedings of IRE. - 1957. – Vol. 45, №9. - P. 1228–1243.